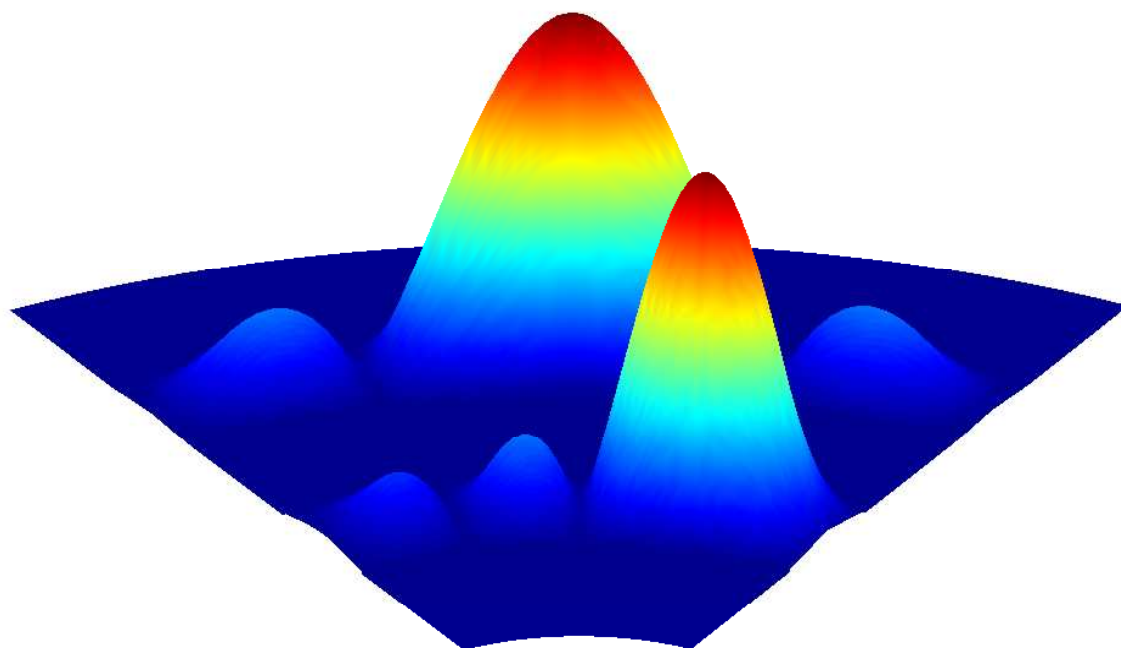


Mário Leandro
Oliveira Lima

Sonar ultra-sónico para pequenos robots





**Mário Leandro
Oliveira Lima**

Sonar ultra-sónico para pequenos robots

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre Integrado em Engenharia Electrónica e de Telecomunicações (MIEET), realizada sob a orientação científica do Dr. Carlos Alberto da Costa Bastos, e do Dr. José Manuel Neto Vieira, Professores auxiliares do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri / the jury

presidente / president

Ana Maria Perfeito Tomé

Professora Associada do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

José Carlos Silva Cardoso

Professor Associado do Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Carlos Alberto da Costa Bastos

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (orientador)

José Manuel Neto Vieira

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (co-orientador)

**agradecimentos /
acknowledgements**

Este espaço é dedicado a todos aqueles que me ajudaram na realização deste projecto. Apesar de ser um projecto individual, foi de extrema importância a contribuição de um vasto conjunto de pessoas, às quais quero aqui expressar o meu mais sincero agradecimento. Em primeiro lugar queria agradecer aos meus orientadores, o Professor Doutor Carlos Alberto da Costa Bastos e o Professor Doutor José Manuel Neto Vieira pelo apoio e disponibilidade demonstrada no decorrer de todo o trabalho. Sem a orientação deles, obviamente o trabalho não teria sido realizado de forma tão objectiva e eficiente.

Queria agradecer igualmente, e sem menos importância, à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã por todo o apoio, incentivo e carinho que me deram o qual foi decisivo para a minha prestação. Não esquecer o agradecimento à Cátia e a todos os meus amigos e colegas.

Por último queria mais uma vez agradecer todo o apoio e disponibilidade prestada pelos colegas da Sala 317, nomeadamente ao Bugalhos, ao Pedro, ao André, ao Branco, ao Tiago e ao Victor, sem nenhuma ordem em particular.

Resumo

O presente documento tem como objectivo descrever a implementação de um Sonar ultra-sónico para pequenos robots. O tema desta dissertação surgiu a partir da observação das limitações existentes nos sistemas ultra-sónicos de detecção de obstáculos disponíveis para os sistemas robóticos. Assim, foi decidido construir um array utilizando sensores de baixo custo. Estes transdutores apresentam contudo um diâmetro com o dobro do comprimento de onda o que não permite, à primeira vista construir um array que evite aliasing espacial. Para resolver este problema é proposto um array do tipo 1.5D que permite evitar o aliasing.

Foi desenvolvido todo o hardware de geração e aquisição de sinal que inclui um DSP de baixo custo para a realização dos algoritmos. Foi igualmente desenvolvido o software de processamento digital de sinal para detecção dos obstáculos a partir dos sinais captados pelo array. Testes realizados com o sistema confirmaram a correcta detecção de obstáculos num feixe de $\pm 40^\circ$.

Abstract

This document describes the practical implementation of an ultrasonic Sonar for small robots. This idea comes up from the observation of the limitations of existing obstacle avoidance ultrasonic systems available for robotic systems. So it was decided to build an ultrasonic array with low cost sensors. These transducers have a diameter that is twice the wavelength of the emitting signal making them on a first sight useless to build an aliasing free array. To solve this problem a 1.5D array is proposed leading to an alias free array.

All the generation and acquisition hardware was developed which includes a low cost DSP for real time signal processing. The algorithm for obstacle detection using the signals acquired by the array was also developed. Real field tests showed the ability of the system to detect obstacles in a beam of $\pm 40^\circ$.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Breve introdução à propagação do som	1
1.3	Objectivos	3
1.4	Organização da dissertação	4
2	Sistemas de detecção de obstáculos por ultra-sons	5
2.1	Dispositivos com sistema ultra-sónico móvel	7
2.2	Dispositivo com múltiplos transdutores segundo vários ângulos	8
2.3	Breve análise comparativa entre sistemas com cinta de transdutores e o implementado	9
3	Agregados (Arrays)	13
3.1	Array linear de sensores pontuais	13
3.2	Array linear de sensores não pontuais	15
3.3	Array bidimensional de sensores pontuais	16
3.4	Array bidimensional de sensores não pontuais	18
3.5	Beam Forming	20
4	Sonar ultra-sónico para pequenos robots	23
4.1	Apresentação e descrição do sistema implementado	23
4.2	Sensores piezoeléctricos de ultra-sons	25
4.3	DSP	25
4.4	Software de aquisição de sinais com DSP	26
4.5	Amostragem de segunda ordem	28
4.6	<i>Locus Board</i>	29
4.7	Extensão da <i>locus board</i>	32
4.8	Circuito de apoio ao array	32
5	Testes e resultados	37
5.1	Estudo da DAC	37
5.2	Medição do diagrama de sensibilidade do array de ultra- -sons	38
5.3	Comparação dos resultados da câmara anecóica com o diagrama de sensibilidade	40
5.4	Testes práticos em ambientes com obstáculos	42
5.5	Obstáculos fora do intervalo de Beam forming	62
5.6	Vários obstáculos à mesma distância e ângulos diferentes	65
5.7	Uso de interpolação	65

5.8	Resumo	67
6	Conclusões e trabalho futuro	69
6.1	Conclusões	69
6.2	Características do sistema	70
6.3	Trabalho Futuro	71
A	Hardware	77
A.1	Circuito que inclui o array	77
A.2	Locus Board v.2.1	79
A.3	Extensão da Locus Board	85
A.4	Circuito de apoio ao array	87
A.5	Circuito somador usado na câmara anecóica	91
B	Referências de alguns transdutores ultra-sônicos	93

Lista de Tabelas

5.1	Tabela com a disposição dos obstáculos para os vários ensaios, nos ensaios 9 e 10 há dois obstáculos.	45
5.2	Tabela com os valores teóricos e os valores obtidos nos ensaios realizados no “ar”, a uma altura de 83,2cm.	46
5.3	Tabela com os valores teóricos e os valores obtidos nos ensaios feitos ao nível do solo, a uma altura de 7.7cm.	47
5.4	Tabela com os valores da variação angular de um obstáculo para uma distância fixa de 1 metro.	64
5.5	Tabela com os valores da variação angular de um obstáculo com outro fixo, para uma distância de 1 metro.	66

Lista de Figuras

1.1	a) - diapasão ultra-sónico; b) - apito de <i>Galton</i>	2
1.2	Vários tipos de transdutores.	3
2.1	Esquema da ecolocalização(Adaptado de Wikipedia.org)	6
2.2	Erro associado à expressão 2.3 em função da temperatura.	7
2.3	Robot com sonar ultra-sónico móvel. (Fonte: [7])	7
2.4	Robot com cinta de transdutores. (Fonte: [8])	8
2.5	a) 5 arrays de transdutores; b) Cinta de 24 transdutores.	9
2.6	Esquemas do espaço percorrido durante um ensaio a) Cinta de 24 transdutores; b) 5 arrays de transdutores.	11
3.1	Diagrama de blocos do array e seu controlo. (Fonte: Adaptado de Catálogo da Olympus.)	13
3.2	Atraso de sinal num array linear.	14
3.3	Função de resposta de um array linear de 8 elementos. (Fonte: [15])	15
3.4	Diagrama de sensibilidade 3D para um array linear de 8 sensores pontuais.	16
3.5	Diagrama de sensibilidade 3D para um array linear de 8 sensores não pontuais.	17
3.6	Array bidimensional construído neste trabalho.	17
3.7	Incidência de ondas planas num array 1.5D.	18
3.8	Diagrama de sensibilidade 3D para um array bidimensional de 4+3 sensores pontuais, com uma configuração igual à da Figura 3.7.	19
3.9	Diagrama de sensibilidade 3D para um array bidimensional de 4+3 sensores não pontuais, com uma configuração igual à da Figura 3.7.	19
3.10	Gráficos do diagrama de sensibilidade do array para um Beam Forming de 30°sem atenuação.	21
3.11	Gráficos do diagrama de sensibilidade do array para um Beam Forming de 30°com atenuação.	21
4.1	Esquema das principais fases do sistema com indicação do estado actual e o Futuro.	24
4.2	Diagrama do hardware (Fonte: adaptado de [5]).	24
4.3	Características do transdutor 400SR10B: a) aspecto físico; b) diagrama de sensibilidade; c) diagrama de sensibilidade e nível de pressão acústica (Fonte: [18]).	25
4.4	Diagrama de sensibilidade do transdutor 400SR10B para 40 kHz, medido na câmara anecóica (Fonte: [17]).	26
4.5	Aspecto da placa que compõe o kit TMX320F2812 eZdsp da TI.	27

4.6	Aspecto do Code Composer Studio e de algumas das suas janelas.	27
4.7	Diagrama geral de fluxo do software da função <i>Main</i> implementada no DSP.	29
4.8	Diagrama geral de fluxo do software dos estados referentes ao serviço à interrupção implementado no DSP.	30
4.9	Cima: Sinal analógico e sua amostragem; Baixo: Amostras de Fase e Quadratura do sinal adquirido.	31
4.10	Aspecto final da placa <i>locus board</i> , frente e verso, respectivamente cima e baixo.	32
4.11	Aspecto final da placa com a extensão da <i>locus board</i> e seu suporte.	33
4.12	Aspecto final do módulo que suporta o array e seu acondicionamento de sinal.	34
4.13	Aspecto final do hardware completo e interligado.	35
5.1	Gráficos com resultados do estudo da DAC na versão anterior da <i>locus board</i>	37
5.2	Gráficos com resultados do estudo da DAC na nova versão da <i>locus board</i>	38
5.3	a) Plataforma de elevação e azimute; b) Placa de amplificação e soma de sinais. (Fonte: [17])	39
5.4	Esquema da montagem usada na câmara anecóica.	39
5.5	Gráficos com diagrama de sensibilidade para elevações 14°, 10°, 5° e 0°.	40
5.6	Gráficos com diagrama de sensibilidade para elevações -5°, -10° e -15°.	41
5.7	Gráficos com diagrama de sensibilidade para elevações -20°, -30° e -40°.	41
5.8	Gráficos com diagrama de sensibilidade para várias elevações e erro associado.	42
5.9	Gráficos com diagrama de sensibilidade para várias elevações e erro associado.	43
5.10	Gráficos com diagrama de sensibilidade normalizados para as várias elevações.	43
5.11	a) esquema dos ensaios feitos no “ar”; b) esquema dos ensaios feitos rente ao solo.	44
5.12	Mapa polar da resposta do array - 1º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a -30° e a 1,1m.	48
5.13	Mapa polar da resposta do array - 1º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a -30° e a 1,1m.	48
5.14	Mapa polar da resposta do array - 1º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a -30° e a 1,1m.	49
5.15	Mapa polar da resposta do array - 2º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a -20° e a 0,8m.	49
5.16	Mapa polar da resposta do array - 2º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a -20° e a 0,8m.	50
5.17	Mapa polar da resposta do array - 2º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a -20° e a 0,8m.	50
5.18	Mapa polar da resposta do array - 3º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a -10° e a 0,7m.	51
5.19	Mapa polar da resposta do array - 3º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a -10° e a 0,7m.	51
5.20	Mapa polar da resposta do array - 3º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a -10° e a 0,7m.	52
5.21	Mapa polar da resposta do array - 4º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 0° e a 1,5m.	52
5.22	Mapa polar da resposta do array - 4º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 0° e a 1,5m.	53

5.23	Mapa polar da resposta do array - 4 ^o Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 0° e a 1,5m.	53
5.24	Mapa polar da resposta do array - 5 ^o Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 10° e a 1,0m.	54
5.25	Mapa polar da resposta do array - 5 ^o Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 10° e a 1,0m.	54
5.26	Mapa polar da resposta do array - 5 ^o Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 10° e a 1,0m.	55
5.27	Mapa polar da resposta do array - 6 ^o Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 20° e a 0,9m.	55
5.28	Mapa polar da resposta do array - 6 ^o Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 20° e a 0,9m.	56
5.29	Mapa polar da resposta do array - 6 ^o Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 20° e a 0,9m.	56
5.30	Mapa polar da resposta do array - 7 ^o Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 30° e a 1,2m.	57
5.31	Mapa polar da resposta do array - 7 ^o Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 30° e a 1,2m.	57
5.32	Mapa polar da resposta do array - 7 ^o Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 30° e a 1,2m.	58
5.33	Mapa polar da resposta do array - 8 ^o Ensaio obtido por simulação. Sem obstáculo.	58
5.34	Mapa polar da resposta do array - 8 ^o Ensaio Prático no ar. Sem obstáculo. .	59
5.35	Mapa polar da resposta do array - 8 ^o Ensaio Prático no solo. Sem obstáculo.	59
5.36	Mapa polar da resposta do array - 9 ^o Ensaio obtido por simulação. Obstáculos a -20° e 0,8m e a 10° e 1,0m.	60
5.37	Mapa polar da resposta do array - 9 ^o Ensaio Prático no ar. Obstáculos a -20° e 0,8m e a 10° e 1,0m.	60
5.38	Mapa polar da resposta do array - 9 ^o Ensaio Prático no solo. Obstáculos a -20° e 0,8m e a 10° e 1,0m.	61
5.39	Mapa polar da resposta do array - 10 ^o Ensaio obtido por simulação. Obstáculos a 0° e 1,5m e a 20° e 0,9m.	61
5.40	Mapa polar da resposta do array - 10 ^o Ensaio Prático no ar. Obstáculos a 0° e 1,5m e a 20° e 0,9m.	62
5.41	Mapa polar da resposta do array - 10 ^o Ensaio Prático no solo. Obstáculos a 0° e 1,5m e a 20° e 0,9m.	62
5.42	Mapa polar do ambiente - 10 ^o Ensaio Prático no solo para Beam Forming de -90° a 90°. Obstáculo a -20° e 0,8m.	63
A.1	Esquema eléctrico do PCB que inclui o array.	77
A.2	Layout do PCB que inclui o array - Top.	78
A.3	Layout do PCB que inclui o array - Bottom.	78
A.4	Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Amplificador áudio para auscultadores estéreo (Fonte: [17]).	79
A.5	Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Amplificador de ganho programável (Fonte: [17]).	80
A.6	Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Bloco de alimentação (Fonte: [17]).	80

A.7	Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Conectores de interface com DSP + RF + Sense Bat (Fonte: [17]).	81
A.8	Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - DAC + Sensor Temperatura (Fonte: [17], com alterações de Mário Lima).	82
A.9	Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - I/O (Fonte: [17], alterado por Mário Lima).	83
A.10	Layout do PCB da <i>LocusBoard</i> - Top (Fonte: [17]).	83
A.11	Layout do PCB da <i>LocusBoard</i> - Bottom (Fonte: [17]).	84
A.12	Esquema eléctrico do PCB da extensão à <i>LocusBoard</i> (Baseado no esquema da Locus Board. Fonte: [17]).	85
A.13	Layout do PCB da extensão à <i>LocusBoard</i> - Top.	86
A.14	Layout do PCB da extensão à <i>LocusBoard</i> - Bottom.	86
A.15	Esquema eléctrico do PCB da placa de apoio à <i>LocusBoard</i> - parte 1 (Baseado no esquema da <i>beamforming_board</i> . (Fonte: [17]))	87
A.16	Esquema eléctrico do PCB da placa de apoio à <i>LocusBoard</i> - parte 2 (Baseado no esquema da <i>beamforming_board</i> . Fonte: [17]))	88
A.17	Esquema eléctrico do PCB da placa de apoio à <i>LocusBoard</i> - parte 3 (Baseado no esquema da <i>beamforming_board</i> . Fonte: [17]))	89
A.18	Layout do PCB da placa de apoio à <i>LocusBoard</i> - Top.	89
A.19	Layout do PCB da placa de apoio à <i>LocusBoard</i> - Bottom.	90
A.20	Esquema eléctrico do PCB da placa somadora, usada na câmara anecóica (Fonte: [17])	91

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Uma das limitações na velocidade de deslocação de um robot autónomo é o elevado tempo necessário na detecção de obstáculos. Sem uma rápida e eficiente análise do ambiente em redor do robot, este tem à partida a sua velocidade limitada. Existem diversas formas de detecção de obstáculos em robótica móvel que usam métodos tão distintos como lasers, imagens (duas câmaras), ultra-sons e infra-vermelhos. No caso do uso de ultra-sons a forma mais tradicional de utilização é a cinta ou anel de transdutores. Esta configuração torna-se pouco fiável e até lenta devido às várias interrogações necessárias com a finalidade de evitar a interferência directa entre emissor e receptor.

Este projecto tem como finalidade projectar e construir um sistema sonar ultra-sónico para detecção de obstáculos dentro de uma área limitada. Os sistemas para robots já existentes para este fim têm como principais desvantagens o seu elevado tempo de processamento, a imprecisão nos resultados obtidos e a necessidade de partes móveis.

Toda a variação angular necessária para a detecção dos obstáculos e das distâncias a que se encontram será feita digitalmente. O sistema possuirá um agregado de transdutores piezoeléctricos e como unidade de processamento um DSP TMS320C2812.

O projecto consiste não só na idealização e estudo de viabilidade do array e processamento necessário, como também na construção de uma primeira versão do hardware a implementar futuramente num robot.

1.2 Breve introdução à propagação do som

Sabe-se que alguns seres vivos têm contacto com o som desde os seus primórdios. Basta por exemplo pensar, que um dos meios de comunicação privilegiado desde o aparecimento dos primeiros animais à face da terra é o uso do som. Alguns animais cedo desenvolveram métodos cognitivos de comunicação usando o som, desde sinais sonoros de alerta, chamamento, identificação, protecção e até mesmo de localização de obstáculos e presas.

O princípio do uso de ultra-sons, por parte do ser humano, remonta a uma época em que mesmo o conhecimento científico de sons era ainda muito escasso. Através da observação e estudo de alguns animais, tais como gatos, cães, morcegos e golfinhos, surgiu a hipótese de existirem sons a frequências diferentes das audíveis pelo Homem. Durante os anos pioneiros no ramo dos ultra-sons (finais do século XIX), as invenções mais relevantes consistiam em dis-

positivos artificiais capazes de produzir ultra-sons. Destes artefactos destacam-se os diapasões de dimensões reduzidas, com um exemplo ampliado na Figura 1.1a) e o apito de Galton na Figura 1.1 b), inventado por *Francis Galton* (1822-1911). Excluindo o uso por parte de alguns investigadores e caçadores furtivos, o uso dos ultra-sons não vingou nessa época, caindo no esquecimento da maioria das pessoas por ser considerada uma área sem aplicação. O seu estudo ficou portanto durante largos anos pouco activo e sem grandes avanços [1].



Figura 1.1: a) - diapasão ultra-sónico; b) - apito de *Galton*.

Contudo, durante a 1ª Guerra Mundial o interesse pelos ultra-sons ressurgiu. Nascia assim o SONAR, dispositivo ainda hoje usado em grande número e com variadas aplicações.

O **SONAR** (do inglês **SO**und **N**avigation **A**nd **R**anging) é um sistema que consegue obter a posição de objectos através da medição do tempo que demora a ser recebido o eco de um sinal enviado contra o objecto. Embora inventado no início da década 1910-1920 pelo físico francês *Paul Langevin*, somente foi proposto em 1917 durante a Primeira Grande Guerra e tinha como função detectar os submarinos alemães através do uso de ultra-sons. Os primeiros dispositivos usados tinham um funcionamento baseado em sensores piezoeléctricos de quartzo. Hoje em dia, os sonares ultra-sónicos já não são tão importantes militarmente para a detecção de alvos, mas continuam a ser utilizados em grande força em áreas como a náutica (para a detecção de cardumes e obstáculos), em sistemas de controlo e indústria automóvel [2].

O **ultra-som** é um som que possui uma frequência superior à que o ser humano consegue ouvir, tipicamente superior a 20.000 Hz. Os sons a estas frequências possuem propriedades similares às dos sons audíveis pelo ser humano. No entanto, alguns animais usam, ou conseguem ouvir sons com estas frequências elevadas, tais como os Morcegos e os Cães. Por exemplo, os morcegos possuem um sistema de ecolocalização ultra-sónica semelhante a um SONAR [1].

Um **transdutor** é um dispositivo que transforma um tipo de energia de entrada noutra forma de energia. No caso particular do nosso sistema, usamos transdutores piezoeléctricos que transformam a energia eléctrica em mecânica, fazendo com que o piezoeléctrico que

contém contraia ou distenda consoante a diferença de potencial aos seus terminais. Este movimento faz com que o ar vibre, originando assim o ultra-som. Na Figura 1.2 são visíveis alguns exemplos de transdutores usados nas mais diversas áreas, como por exemplo a medicina, controlo, limpeza, metalurgia, automóvel, etc. No Anexo B estão algumas referências de transdutores para várias aplicações. Os transdutores piezoelétricos possuem ainda a propriedade de fazer o inverso, ou seja, quando recebem ondas ultra-sónicas na sua frequência de trabalho, colocam uma diferença de potencial nos seus terminais proporcional à pressão exercida pelo som no piezoelétrico [1].



Figura 1.2: Vários tipos de transdutores.

A primeira aplicação de sistemas ultra-sónicos ao “ar livre” foi em máquinas fotográficas com a finalidade de auxiliar na focagem automática [1]. No entanto, os primeiros sistemas deste tipo não vingaram, devido ao facto de o ar ser um meio menos favorável à propagação de ondas sonoras comparativamente com a água. Como tal, durante vários anos os sistemas ultra-sónicos usados na água tiveram avanços extraordinários em comparação com os aéreos que praticamente ficaram estagnados. Actualmente, a utilização destes sistemas de ultra-sons ao ar livre têm recebido mais atenção por parte da comunidade de investigadores, devido ao seu baixo preço e simplicidade de uso [1].

1.3 Objectivos

Este projecto tem como principal objectivo projectar e construir um dispositivo que proceda à detecção da presença de obstáculos utilizando um agregado de sensores de ultra-sons de baixo custo que permitem uma maior taxa de amostragem do meio que os sistemas convencionais. Espera-se portanto, que um robot que use este sonar possa andar mais rápido e eficientemente, do que no caso de usar um dispositivo com função idêntica já existente, como por exemplo, uma cinta de sensores ultra-sónicos.

O facto de o processamento ser totalmente digital, possibilita a fácil alteração das configurações do sistema, como por exemplo, a frequência com que executa a análise ao meio ou

mesmo o alcance mínimo e máximo do sonar.

O trabalho consiste não só no desenvolvimento de software e no estudo teórico do sistema, mas também na construção física de um primeiro protótipo para testes e uma base para possível continuação do projecto em anos seguintes.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos.

No 1º capítulo é apresentado o motivo da execução deste projecto, assim como, uma breve introdução a alguns conceitos no âmbito da propagação do som, usados no decorrer desta dissertação.

Os vários sistemas usados para detecção de obstáculos através de ultra-sons, assim como, uma breve descrição dos seus elementos constituintes são apresentados no capítulo 2.

Agregados (Arrays) é o nome do capítulo 3, cujo conteúdo se centra no estudo teórico dos agregados de transdutores.

O capítulo 4 contém a continuação do desenvolvimento do projecto, a fundamentação das decisões tomadas, diagramas de fluxo para melhor interpretação do seu funcionamento, esquemas dos subsistemas implementados e abordagem ao hardware e software desenvolvido.

No capítulo 5 são descritos todos os testes executados e resultados obtidos ao longo do projecto e é feita uma breve análise dos resultados.

Por fim, o capítulo 6 comporta as conclusões e o trabalho a desenvolver no futuro.

Capítulo 2

Sistemas de detecção de obstáculos por ultra-sons

Os sistemas de detecção de obstáculos por ultra-sons, tal como o nome indica, têm a finalidade de localizar obstáculos através de ultra-sons, numa determinada área. Este objectivo pode ser conseguido através de métodos mais ou menos rápidos, conforme o tipo de sistema usado para o fazer. A par do surgimento de novas tecnologias e da constante evolução em praticamente todos os ramos da ciência, a robótica e a condução autónoma acompanha essa evolução.

Portanto, hoje mais que nunca, são necessários sistemas eficientes e rápidos de análise do meio circundante de um dispositivo móvel. É portanto inerente aos robots munidos destes sistemas, uma relação directa entre a velocidade máxima de deslocação do robot e a rapidez/eficiência de decisão face ao seu meio circundante que o dispositivo móvel consegue possuir.

Os sistemas ultra-sónicos já existentes para a detecção de obstáculos têm na ecolocalização a principal base para o cálculo das posições relativas dos obstáculos. A ecolocalização consiste na determinação do tempo de voo decorrente entre a emissão do sinal por parte do emissor e a chegada dos seus ecos ao receptor. Como se pode verificar observando a Figura 2.1, o tempo de voo será o tempo necessário para percorrer duas vezes a distância r , sendo r a distância entre o emissor/receptor e o objecto. Para o caso em análise a distância percorrida d é de $d = 2r$ comportando assim o tempo de voo do sinal entre o emissor/receptor e o obstáculo e o retorno do seu eco novamente até ao emissor/receptor.

A distância d poderá facilmente ser determinada através da Equação 2.1, dada em metros, em que T_V é o tempo de voo em segundos, e c a velocidade do som no meio às condições sujeitas em metros por segundo [3]. A velocidade do som c considerada em todo o trabalho é referente à velocidade verificada num ambiente a 20°C é de $343,4\text{m/s}$ [4].

$$d = T_V c \quad (2.1)$$

As ondas ultra-sónicas sofrem atenuação devido principalmente a fenómenos de absorção do meio, de dispersão e de reflexões em obstáculos. As perdas por fenómenos de reflexão em obstáculos não são consideradas neste trabalho, visto que todos os ecos recebidos pelo sistema foram previamente reflectidos por objectos provavelmente diferentes, dos quais à partida se desconhece a composição. O valor das perdas por absorção do meio é de $1,26\text{dB/m}$, para

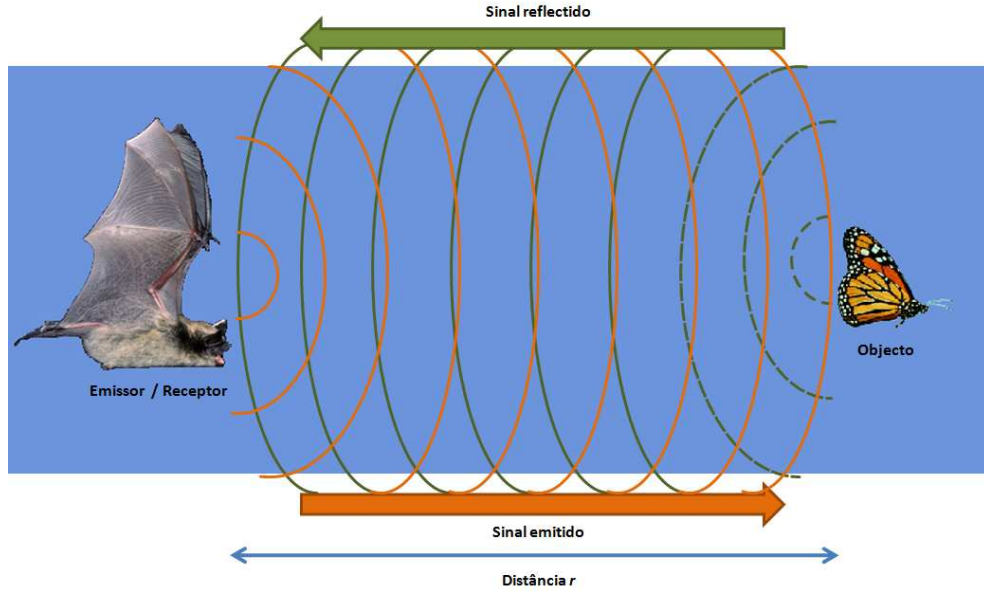


Figura 2.1: Esquema da ecolocalização(Adaptado de Wikipedia.org)

$T = 25^{\circ}C$, a 1atm de pressão, 66% de humidade relativa e para frequência de $40kHz$ [5]. Por sua vez o valor das perdas por dispersão é de $20 \log_{10}(x)$, com x sendo a distância.

Para além da influência na atenuação dos ultra-sons, as condições do meio influenciam igualmente a velocidade de deslocação das mesmas no ar. Para este cálculo teremos somente em conta o factor temperatura, embora existam outros, nomeadamente a humidade, a pressão e a frequência. A Equação 2.2 descreve a dependência da velocidade da onda sonora no ar relativamente à temperatura, em que o θ é a temperatura ambiente [6].

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273.15}} \quad (2.2)$$

De forma a facilitar o cálculo do acerto da velocidade da onda por parte do DSP, a Equação 2.2 foi expandida alguns termos, através da série *Taylor*, originando a Equação 2.3. Agora, o cálculo a fazer não passa de uma multiplicação e uma soma, obtendo-se assim os valores da velocidade do som para várias temperaturas, presentes na Figura 2.2, assim como o erro resultante entre os valores da série expandida e os da expressão original [5].

$$c = c_0 + 0.6\theta \quad (2.3)$$

As formas mais utilizadas para o cálculo das posições dos obstáculos numa determinada área são os dispositivos com sistema de sonar móvel e os com transdutores direccionados angularmente para a área em questão, com os funcionamentos apresentados de seguida.

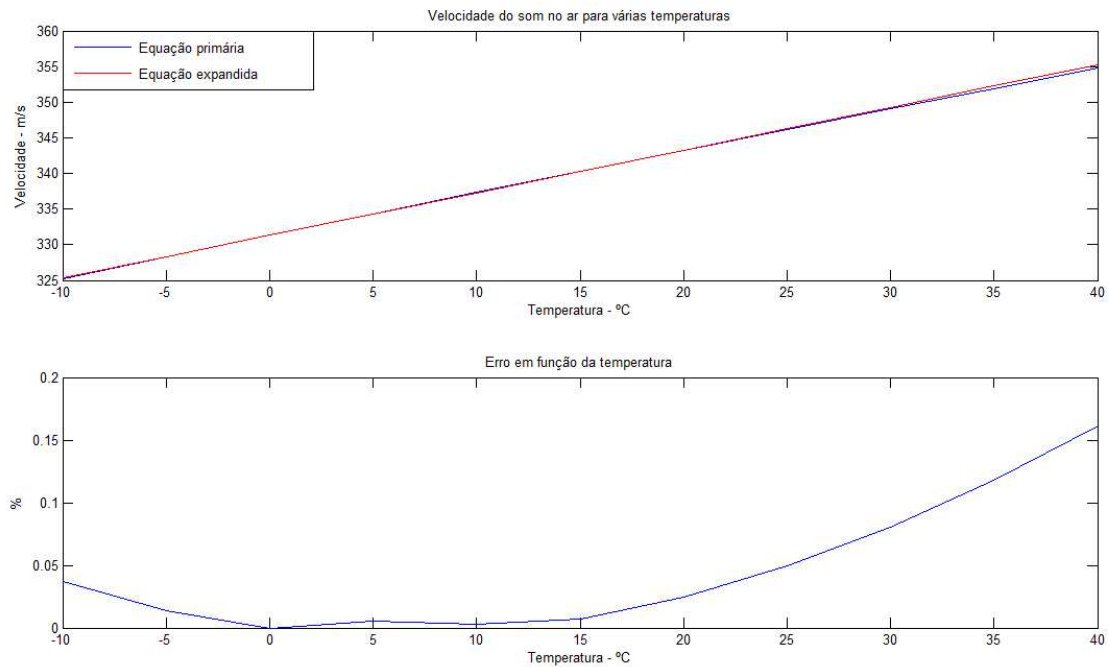


Figura 2.2: Erro associado à expressão 2.3 em função da temperatura.

2.1 Dispositivos com sistema ultra-sónico móvel

Os dispositivos com sistema ultra-sónico móvel têm o mesmo princípio de funcionamento de um radar. Para cada incremento de rotação do transdutor faz-se uma verificação da existência de objectos segundo essa direcção. Estes sistemas móveis necessitam de um servo/motor e do seu controlador para mover o transdutor. Um sistema deste tipo é apresentado na Figura 2.3.

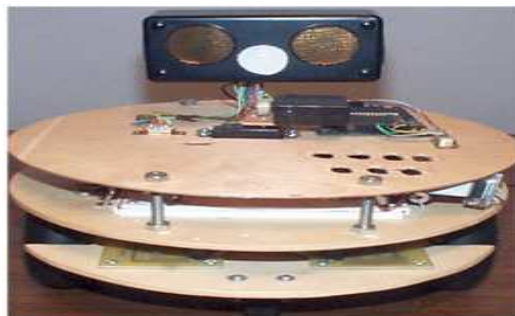


Figura 2.3: Robot com sonar ultra-sónico móvel. (Fonte: [7])

Prós:

- Possuem somente um ou dois transdutores que efectuem a emissão e recepção do ultra-som;

- O controlador dos módulos não necessita de grande capacidade de processamento.

Contras:

- A precisão angular da localização do objecto depende da precisão do servo/motor que move o transdutor e do número de medidas efectuadas;
- Muito tempo gasto entre cada análise;
- Necessidade de garantias que a análise é feita enquanto o transdutor se encontra apontado na direcção para a qual emitiu o sinal ou que a recepção do mesmo é feita ainda na região activa do sistema.

2.2 Dispositivo com múltiplos transdutores segundo vários ângulos

Os dispositivos com múltiplos transdutores segundo diferentes ângulos possuem vários módulos de detecção de objectos direccionados para as zonas que desejam cobrir. Cada módulo tem um período de tempo do processador reservado só para efectuar o processamento necessário à sua área de análise. Na Figura 2.4 podemos observar um exemplo de um sistema deste tipo onde se pode constatar a cinta de transdutores no topo do robot.

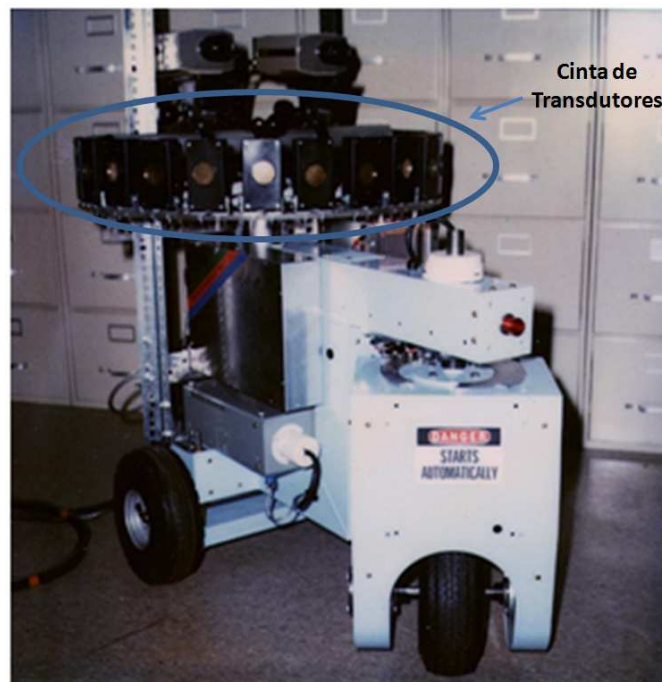


Figura 2.4: Robot com cinta de transdutores. (Fonte: [8])

Prós:

- Podemos colocar maior ou menor número de módulos em determinadas direcções;
- O controlador dos módulos não necessita de grande capacidade de processamento.

Contras:

- A precisão do ângulo em que se encontra um objecto depende do número de módulos existentes, da sua orientação e do seu diagrama de sensibilidade;
- Elevado tempo gasto a analisar todos os módulos existentes;
- Os módulos não podem ser disparados todos ao mesmo tempo.

Praticamente todos estes sistemas estão limitados a uma unidade semelhante por cada espaço físico, pois facilmente será induzido em erro por dispositivos de igual funcionamento. Outro inconveniente para este tipo de sistemas é a possibilidade de existência de fontes de ultra-sons na mesma área, operando na mesma frequência, que podem provocar interferências na detecção dos obstáculos.

Na actualidade já existem sistemas ultra-sónicos com algumas provas dadas na localização de objectos ou emissores, em diferentes meios e para diferentes aplicações, como por exemplo: sonar aquático (interface água) [9], sonar aéreo (interface ar) [10], The Bat Ultrasonic Location System (interface ar) [11], Parrot (interface ar) [12], The Cricket Indoor Location System (interface ar) [13] e Neptune [14].

2.3 Breve análise comparativa entre sistemas com cinta de transdutores e o implementado

De seguida, é apresentada uma breve análise comparativa entre um robot com uma cinta de transdutores e o sistema implementado. O robot com a cinta, possui uma finalidade de mapeamento similar ao implementado, no entanto, possui uma cobertura de 360° ao passo que o nosso array somente tem 80° . Este facto faz com que seja “necessário” 4.5 arrays para cobrir toda a circunferência. Na impossibilidade de termos os 4.5, consideramos portanto o nosso sistema como um grupo de 5 arrays semelhantes ao construído, cobrindo assim toda a circunferência. No entanto, entende-se que num robot com a principal finalidade de andamento rápido para a frente, não há grande necessidade de sensores na retaguarda, ou mesmo uma grande quantidade nas laterais.

A cinta de transdutores, como demonstra o esquema da Figura 2.5 b), possui 24 sensores igualmente espaçados de 15° cada, e o nosso sistema 5 arrays espaçados de 72° cada, como indicado na Figura 2.5 a).

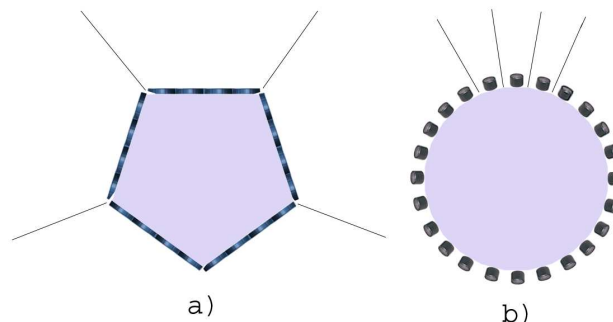


Figura 2.5: a) 5 arrays de transdutores; b) Cinta de 24 transdutores.

Para esta comparação entre os dois sistemas, o da cinta de transdutores e o nosso, foram usados certos parâmetros que foram obtidos ao longo do desenvolvimento do nosso projecto. Em primeiro lugar, a duração do envio do sinal é de $t_{envio} = 800\mu s$, valor este superior ao tempo necessário para excitação do transdutor emissor piezoeléctrico usado e por corresponder ainda a um número inteiro de períodos de onda de $40kHz$.

De seguida, o tempo usado para evitar interferência directa entre o emissor e os receptores foi de $t_{ID} = 1560\mu s$. Este valor inicialmente era de $250\mu s$, e foi calculado através do tempo que demorava um sinal, viajando no ar, a atravessar todo o array. Este valor verificou-se insuficiente, pois a potência do ruído recebido pelos receptores depois desse valor inicial era muito elevada em comparação com a dos ecos posteriormente recebidos dos obstáculos. Portanto, através de dados experimentais o valor de $1560\mu s$ foi considerado suficiente e adequado para evitar a interferência directa entre a emissão e recepção. O tempo t_{ID} usado faz com que a distância mínima que pode ser analisada seja de cerca de $40,5cm$ de alcance, ou o correspondente de $81cm$ de viagem do sinal.

Para o tempo de amostragem correspondente a 2 metros de alcance, foi determinado o tempo de $t_{voo} = 11648\mu s$. Este tempo é obtido através do tempo necessário para que o sinal percorra $319cm$, que resulta dos $4m$ que o sinal teria que percorrer, menos os $81cm$ usados para evitar a interferência directa.

Por último, foi ainda considerado um tempo de segurança de $t_{seg} = 3464\mu s$, usado para evitar que os receptores recebam ecos vindo de possíveis obstáculos até 3 metros de alcance. Este valor foi estipulado, tendo em consideração que as amplitudes dos ecos recebidos de obstáculos a partir dessa distância não tenham valor significativo em comparação com os ecos vindos de 2 metros de alcance. O valor de t_{seg} não é, no entanto, tão elevado como seria de esperar ao corresponder a um metro de alcance, pois a esse valor foi subtraído o tempo de envio da próxima onda (t_{envio}) e ainda o tempo de espera para evitar a interferência directa entre emissor e receptores (t_{ID}).

Considerando ainda os tempos de resposta dos transdutores iguais para os dois casos, temos as seguintes características para ambos:

- Duração do sinal de envio $t_{envio} = 800\mu s$;
- Tempo para evitar a ocorrência de interferência directa entre emissor e receptores de $t_{ID} = 1560\mu s$;
- Duração da amostragem correspondente a 2 metros de alcance $t_{voo} = 11648\mu s$;
- Tempo de segurança entre o fim da amostragem e o próximo envio de $t_{seg} = 3464\mu s$.

Tendo em conta toda a informação imediatamente atrás mencionada, por cada análise ao meio decorre um tempo igual à soma de todos os tempos presentes nos itens anteriores, ou seja de $t_{ensaio} = 15.108ms$. Então, o tempo para uma análise dos 360° com o nosso sistema é o t_{ensaio} vezes 5 para o nosso projecto e vezes 24 para a cinta de transdutores. O tempo total é de $75.54ms$ e de $362.592ms$, respectivamente para o nosso projecto e para o da cinta, tendo portanto, cada um uma frequência de análise correspondente do meio de $13.23Hz$ e $2.76Hz$.

Supondo uma velocidade de $2m/s$ para um robot que usasse estes tipos de sonares, as distâncias mínimas de paragem seriam de $184.89cm$ e $127.48cm$ respectivamente para o nosso sistema e para o sistema com cinta de sensores, como se pode observar através dos esquemas presentes na Figura 2.6 a) e Figura 2.6 b). De seguida analisa-se somente o esquema a), pois

o b) possui a mesma lógica. Considerando o robot a andar em frente e na posição 0 aquando do envio do sinal, este estará preparado para o próximo envio quando já se encontrar na posição $72,52cm$. Supondo que na primeira análise não se encontrava nenhum obstáculo no seu caminho, mas que aquando da segunda emissão se encontra um a $272,52cm$, este vai ser detectado na segunda análise ao meio. Quando o robot estiver então preparado para iniciar a terceira emissão, e por consequente tiver detectado a presença de um obstáculo a $200cm$ este (o obstáculo) já só estará a $127,48cm$ de distância, pois a posição actual do robot será de $145,04cm$. De igual forma se interpreta o esquema b) da Figura 2.6.

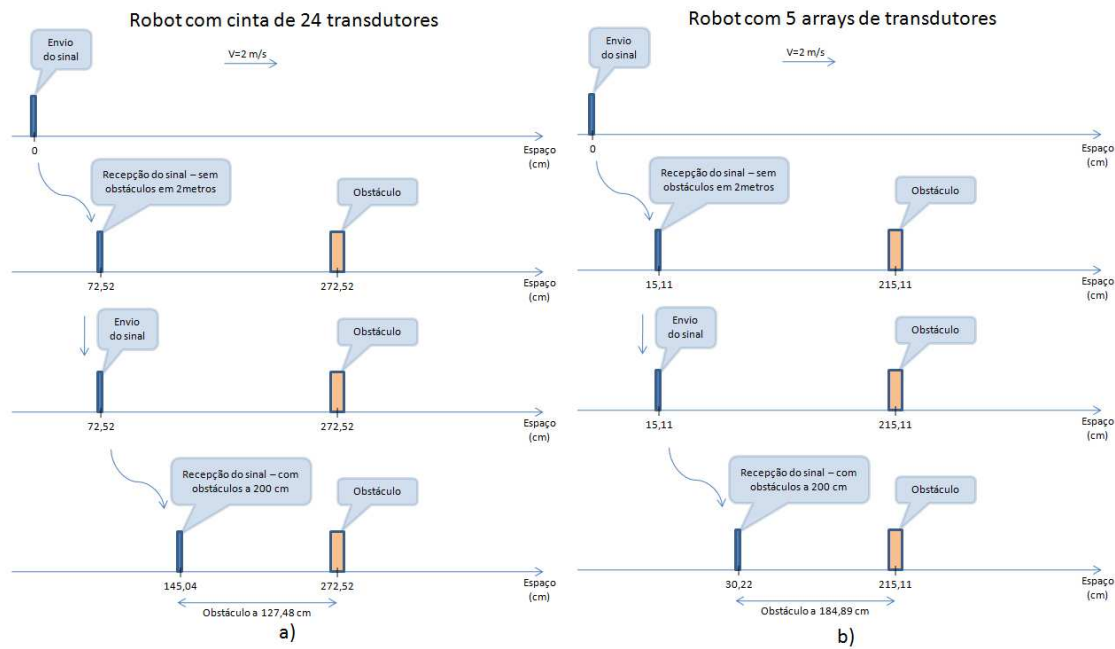


Figura 2.6: Esquemas do espaço percorrido durante um ensaio a) Cinta de 24 transdutores; b) 5 arrays de transdutores.

Como limite máximo de velocidade para os dois casos vamos ter a velocidade, em que o robot anda os 2 metros de alcance do sonar, durante o tempo de cada ensaio. Na realidade, esta situação não pode ocorrer, pois assim o robot ficaria sem espaço para travar, ou mudar de rota antes do embate com o obstáculo. Ignorando a inexistência de espaço para a travagem, a velocidade máxima para cada caso é de 26.48 m/s para o nosso sistema e 5.52 m/s para a cinta de transdutores. Como curiosidade, o robot da Figura 2.4 que contém a cinta, tem como característica ser rápido, pois usa um computador para comandar o processo e mesmo assim devido ao gasto computacional demora entre 30 a 60 segundo para andar 1 metro e fazer a sua análise do meio envolvente [14].

Capítulo 3

Agregados (Arrays)

Um array de transdutores de ultra-sons é um conjunto de transdutores dispostos segundo uma certa configuração geométrica, sendo a sua resposta obtida por uma combinação dos sinais que chegam a cada um dos transdutores. Usualmente, tem-se controlo sobre os atrasos de cada canal, antes da soma ou da emissão, o que nos permite direccionar o seu ganho máximo para uma determinada direcção, procedimento este, que se chama Beam Forming. De uma maneira geral pode dividir-se a composição do array e seu controlo através dos blocos presentes no diagrama da Figura 3.1.

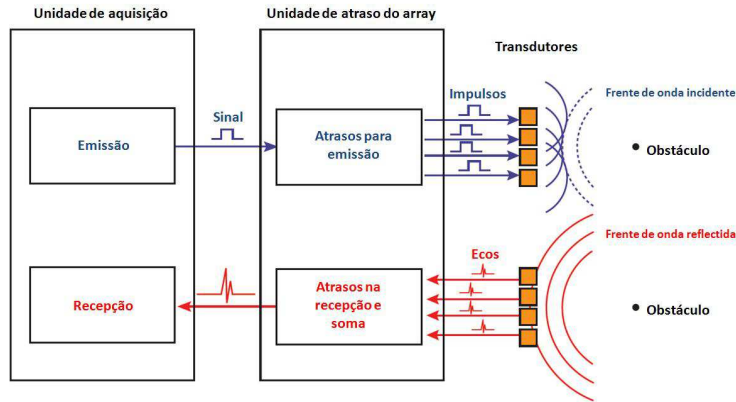


Figura 3.1: Diagrama de blocos do array e seu controlo. (Fonte: Adaptado de Catálogo da Olympus.)

3.1 Array linear de sensores pontuais

Como o sistema é constituído por um array de transdutores pontuais, as ondas reflectidas pelos objectos chegam a estes com atrasos relativos entre eles. Atrasos estes que se podem relacionar directamente com o ângulo de chegada da onda. Considerando a onda reflectida pelos objectos como sinusoidal e plana, pode ser descrita pela Equação 3.1, sendo A a amplitude da onda que chega aos transdutores, i igual a $\sqrt{-1}$, ω_0 a frequência angular do sinal e ϕ_0 a fase inicial do sinal.

$$y(t) = Ae^{i\omega_0 t + \phi_0} \quad (3.1)$$

Como se pode observar através da Figura 3.2, vai existir um atraso entre os sinais recebido por sensores consecutivos em função do ângulo θ de incidência dos ecos. Estes chegam portanto a um transdutor de um array linear com um atraso de espaço ($\zeta_m(\theta)$) e de tempo ($\alpha_m(\theta)$), em relação ao referencial do array, e descritos respectivamente pelas Equações 3.2 e 3.3.

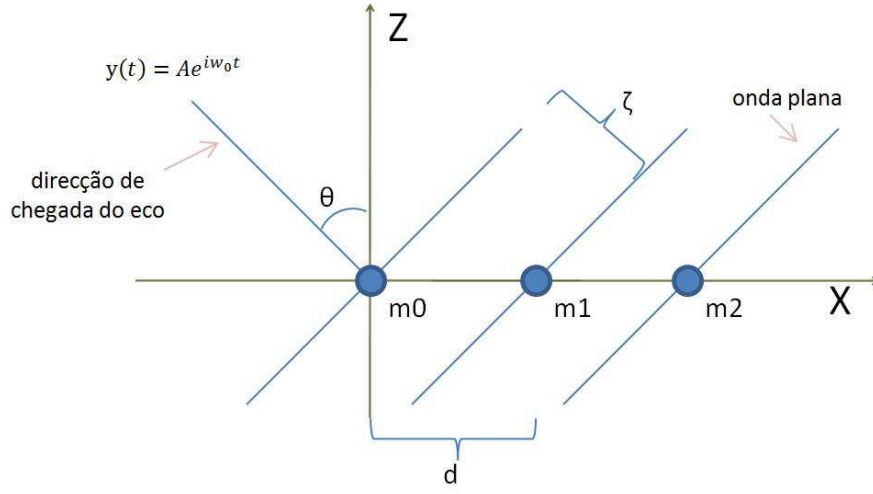


Figura 3.2: Atraso de sinal num array linear.

$$\zeta_m(\theta) = d_{mx} \sin \theta \quad (3.2)$$

$$\alpha_m(\theta) = \frac{\zeta_m(\theta)}{c} = \frac{d_{mx} \sin \theta}{c} \quad (3.3)$$

Sendo d_{mx} a distância entre o transdutor e a origem do array segundo o eixo do X, c é a velocidade do som no meio, m o índice do transdutor ($m = 0, 1, 2, 3, \dots, M-1$) e M o número de transdutores do array. Como tal, o sinal que chega a cada transdutor do array é descrito pela Equação 3.4 e o seu resultante descrito pela soma, Equação 3.5.

$$x_m(t, \theta) = A_m e^{i\omega_0(t - \alpha_m(\theta))} \quad (3.4)$$

$$z(t, \theta) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{i\omega_0(t - \alpha_m(\theta))} \quad (3.5)$$

Para este caso particular de consideração de sensores pontuais, segundo [15], a função resposta de um array de 8 elementos é dada pela expressão 3.6 da qual se gerou o gráfico presente na Figura 3.3, onde podem ser observados os lóbulos secundários presentes no diagrama de sensibilidade do array.

$$H(\omega\tau) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{i\omega_0 \alpha_m(\theta)} \quad (3.6)$$

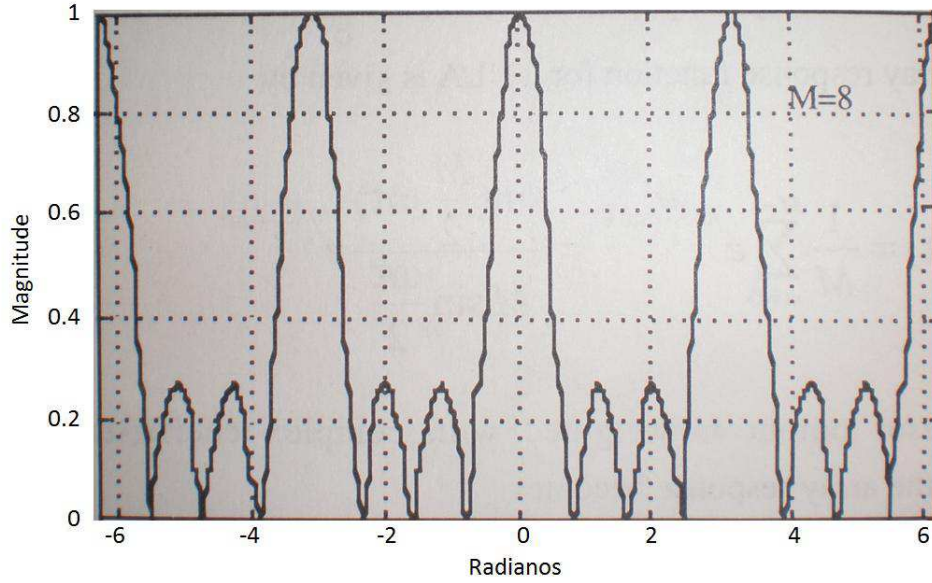


Figura 3.3: Função de resposta de um array linear de 8 elementos. (Fonte: [15])

Para se poder focar um array segundo uma direcção (Beam Forming), sem que exista ambiguidade quanto à direcção em questão, o espaçamento entre os seus elementos tem que obedecer ao Teorema de *Nyquist* espacial. Deste modo, evitamos os lóbulos secundários existentes a cada $\pm n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) radianos do lóbulos central, no diagrama de sensibilidade do array. Para evitar este problema, a distância entre transdutores consecutivos deve obedecer à relação presente na Equação 3.7. Considerando d a distância entre os transdutores consecutivos, λ o comprimento de onda e θ o ângulo de chegada do sinal ao array.

$$\frac{d}{\lambda} \sin \theta \leq \frac{1}{2} \quad (3.7)$$

Podendo no entanto, ser simplificada para a expressão da Equação 3.8, caso se restrinja o Beam Forming a $\pm\pi$ radianos e se mantenha a frequência do sinal fixa, como é o caso do sistema implementado [15] e [16].

$$d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (3.8)$$

O diagrama de sensibilidade 3D resultante do array linear de 8 elementos espaçados de $9.9mm$ está representado no gráfico da Figura 3.4.

3.2 Array linear de sensores não pontuais

Na prática, os transdutores usados neste projecto não são pontuais, pelo que possuem um diagrama de sensibilidade característico que será abordado oportunamente mais à frente neste documento. Esta característica própria de cada transdutor, faz com que o aspecto final do diagrama de sensibilidade de cada array seja diferente do da Figura 3.4. Para o caso dos

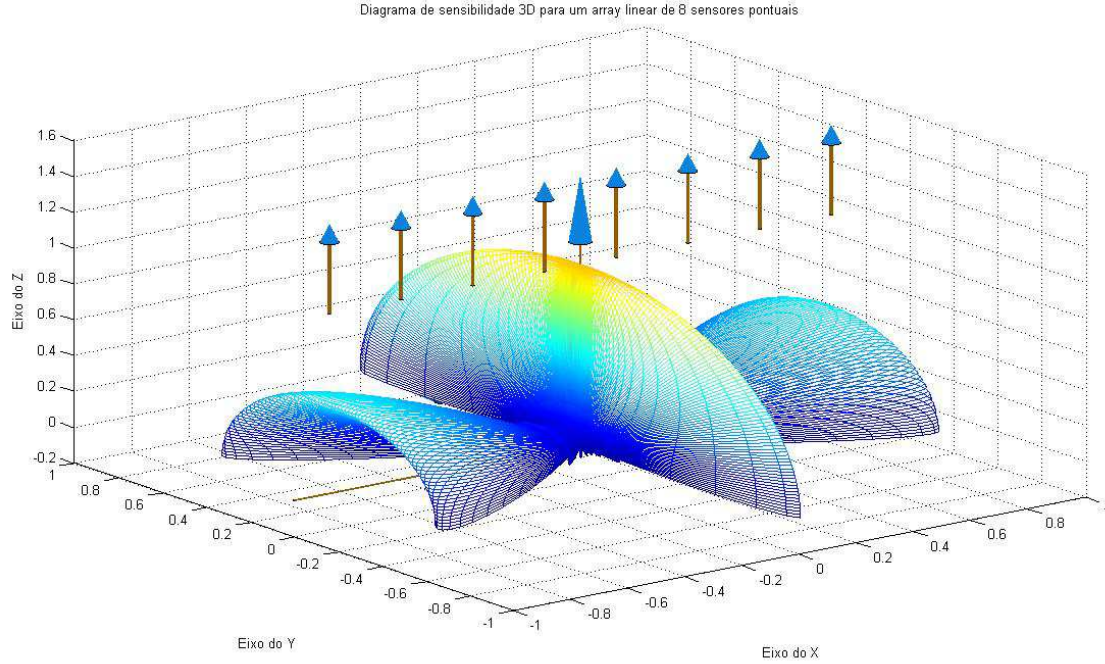


Figura 3.4: Diagrama de sensibilidade 3D para um array linear de 8 sensores pontuais.

sensores usados no nosso projecto o diagrama de sensibilidade 3D que se obtém na prática é sensivelmente igual ao presente na Figura 3.5, com $9.9mm$ de espaçamento entre sensores.

3.3 Array bidimensional de sensores pontuais

Antes da construção do array bidimensional (1.5D) de 7 elementos foi pensado num array linear (1D) de oito transdutores, mas dado que o diâmetro dos transdutores é $9.9mm$, a distância máxima entre os centros dos transdutores será sempre superior a meio comprimento de onda ($4.3mm$). Foi construído então, um array bidimensional do tipo 1.5D, que não é mais que um array que possui poucos elementos numa direcção em relação à outra. No array em questão, a diferença do número de sensores segundo as duas direcções não é significativa, pois possui 4 sensores em linha mais 3 imediatamente colocados junto aos pontos de contacto dos anteriores, como se pode visualizar através do esquema da Figura 3.6. Para este caso a linha de sensores sobre o eixo dos XX possui elementos nas posições $x = -14,85mm$; $x = -4,95mm$; $x = 4,95mm$ e $x = 14,85mm$ e a linha superior situa-se em $y = 8,57mm$ e os sensores em $x = -9.9mm$; $x = 0mm$ e $x = 9.9mm$.

A configuração mostrada na Figura 3.6 faz com que a distância entre os centros dos transdutores, projectados no eixo dos XX, tenha metade do valor que no caso do array linear. Isto é útil no caso de usarmos o array 1.5D, somente para focagem segundo o plano XZ, ou seja para θ de 0 a 90 e ϕ igual a 0 e 180. Podemos considerar o array praticamente como um array linear com distância entre transdutores consecutivos de metade da do array linear inicial de 8 transdutores, pois o comportamento é muito semelhante.

De forma semelhante ao array linear, o atraso espacial e temporal que cada sinal recebido pelos transdutores sofrem são expressos através das expressões 3.9 e 3.10 e visualizada na

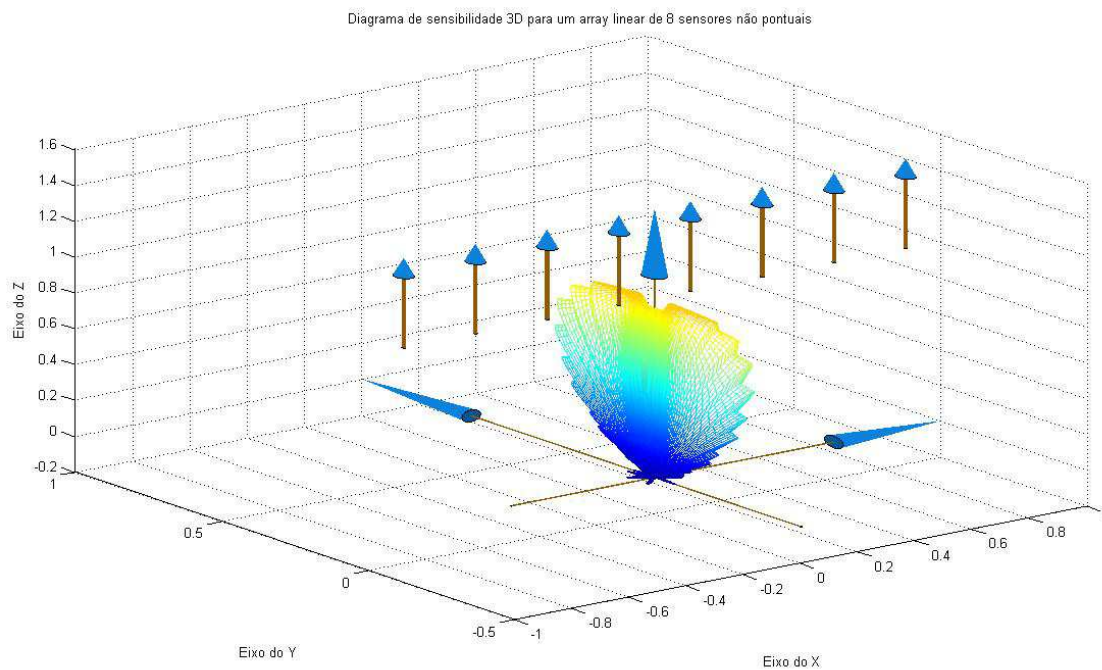


Figura 3.5: Diagrama de sensibilidade 3D para um array linear de 8 sensores não pontuais.



Figura 3.6: Array bidimensional construído neste trabalho.

Figura 3.7 [15].

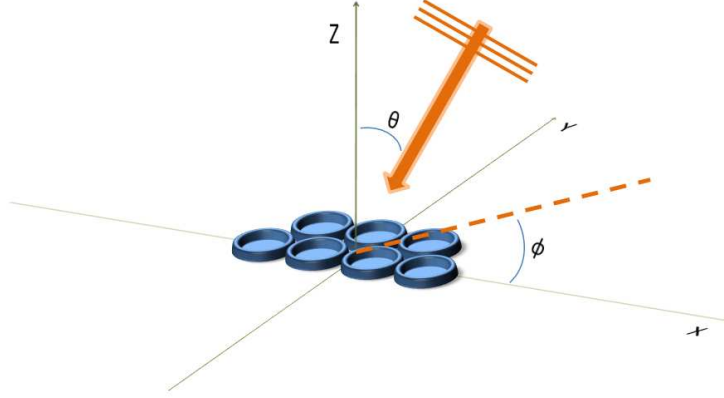


Figura 3.7: Incidência de ondas planas num array 1.5D.

$$\zeta_m(\theta, \phi) = d_{mx} \sin \theta \cos \phi + d_{my} \sin \theta \sin \phi \quad (3.9)$$

$$\alpha_m(\theta, \phi) = \frac{\zeta_m(\theta)}{c} = \frac{d_{mx} \sin \theta \cos \phi + d_{my} \sin \theta \sin \phi}{c} \quad (3.10)$$

Sendo d_{mx} e d_{my} as distâncias entre os transdutores e a origem do array segundo os eixos do X e Y respectivamente, c é a velocidade do som no meio, m o índice do transdutor em questão ($m = 0, 1, 2, 3, \dots, M-1$) e M o número total de transdutores receptores do array. Como tal, o sinal que chega a cada transdutor do array é descrito na Equação 3.11. De igual forma o sinal resultante do array está representado na Equação 3.12, sendo a única alteração em relação ao array linear o facto de agora se considerar um sinal proveniente de uma direcção descrita por dois ângulos.

$$x_m(t, \theta, \phi) = A_m e^{i\omega_0(t - \alpha_m(\theta, \phi))} \quad (3.11)$$

$$z(t, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{i\omega_0(t - \alpha_m(\theta, \phi))} \quad (3.12)$$

Portanto, o diagrama de sensibilidade 3D para este array é dado pelo gráfico da Figura 3.8.

3.4 Array bidimensional de sensores não pontuais

Pelo mesmo motivo da não pontualidade dos transdutores usados, também o diagrama de sensibilidade do array 1.5D sofre uma alteração. Esta pode ser observada através do gráfico da Figura 3.9.

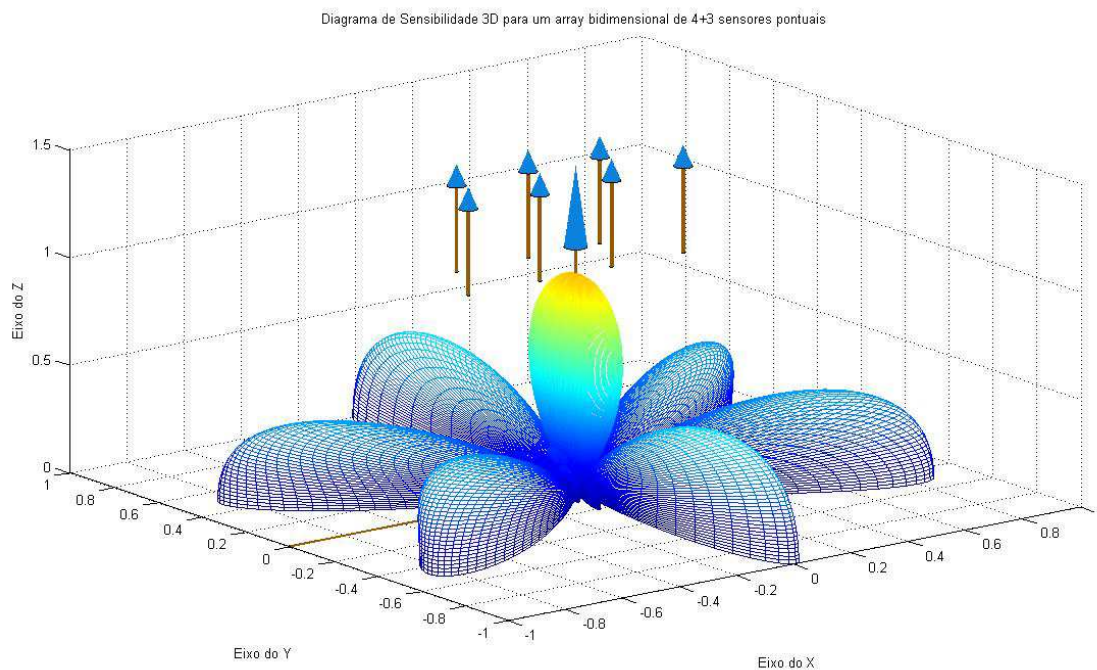


Figura 3.8: Diagrama de sensibilidade 3D para um array bidimensional de 4+3 sensores pontuais, com uma configuração igual à da Figura 3.7.

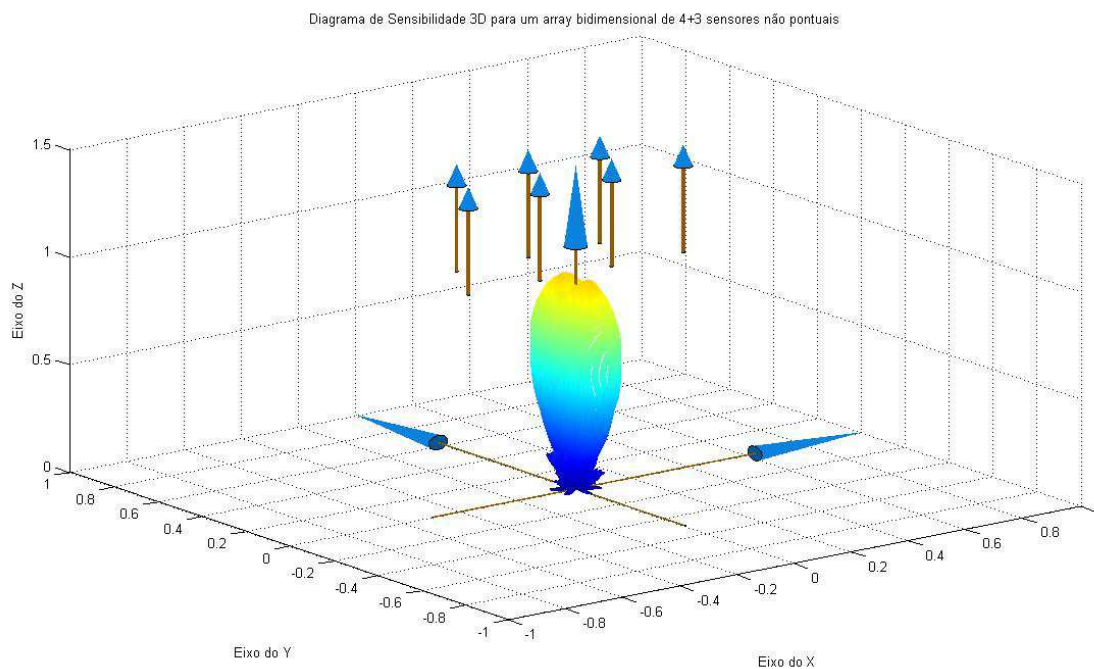


Figura 3.9: Diagrama de sensibilidade 3D para um array bidimensional de 4+3 sensores não pontuais, com uma configuração igual à da Figura 3.7.

3.5 Beam Forming

Através de uma breve análise da Equação 3.12, podemos verificar que para um t fixo o sinal tem um máximo quando o sinal vem de uma direcção correspondente a $\theta = 0$. No entanto, o máximo pode ser mudado para outra direcção, através da introdução, antes da soma, de um atraso temporal ou do correspondente atraso de fase, em cada sinal recebido nos transdutores.

O atraso, em relação à origem do array, a introduzir para o direccionar do feixe para um determinado ângulo (θ_0, ϕ_0) é calculado da mesma forma que o atraso existente entre cada transdutor, na recepção de um sinal no array. Como tal, a expressão do atraso a introduzir em cada transdutor é dado pela Equação 3.13.

$$\alpha_{0m}(\theta_0, \phi_0) = \frac{d_{mx} \sin \theta_0 \cos \phi_0 + d_{my} \sin \theta_0 \sin \phi_0}{c} \quad (3.13)$$

Tendo em consideração que θ_0 e ϕ_0 são os ângulos da direcção para o qual se pretende direccionar o feixe, ou seja, fazer Beam Forming. Depois de se saber o atraso a introduzir em cada transdutor, a expressão do sinal resultante de cada transdutor é dado pela Equação 3.14.

$$x_{bm}(t, \theta, \theta_0, \phi, \phi_0) = A_m e^{i\omega_0(t - (\alpha_m(\theta, \phi) - \alpha_{0m}(\theta_0, \phi_0)))} \quad (3.14)$$

A soma de todos os sinais que chegam dos transdutores, com o respectivo Beam Forming é, portanto, dada pela Equação 3.15.

$$z_b(t, \theta, \theta_0, \phi, \phi_0) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{i\omega_0(t - (\alpha_m(\theta, \phi) - \alpha_{0m}(\theta_0, \phi_0)))} \quad (3.15)$$

Nos gráficos das Figuras 3.10 e 3.11, pode ver-se o módulo do sinal dado pela Equação 3.15 para o caso de $\theta_0 = 30$ e $\phi = 0$. O primeiro gráfico é referente ao array sem o uso da atenuação correspondente ao diagrama de radiação dos transdutores e o segundo com a respectiva atenuação.

Como podemos verificar pela observação dos gráficos, o diagrama de sensibilidade dos transdutores ajuda na atenuação dos lóbulos secundários. No entanto, somente o evita até beam forming de cerca de 30° [15] e [16].

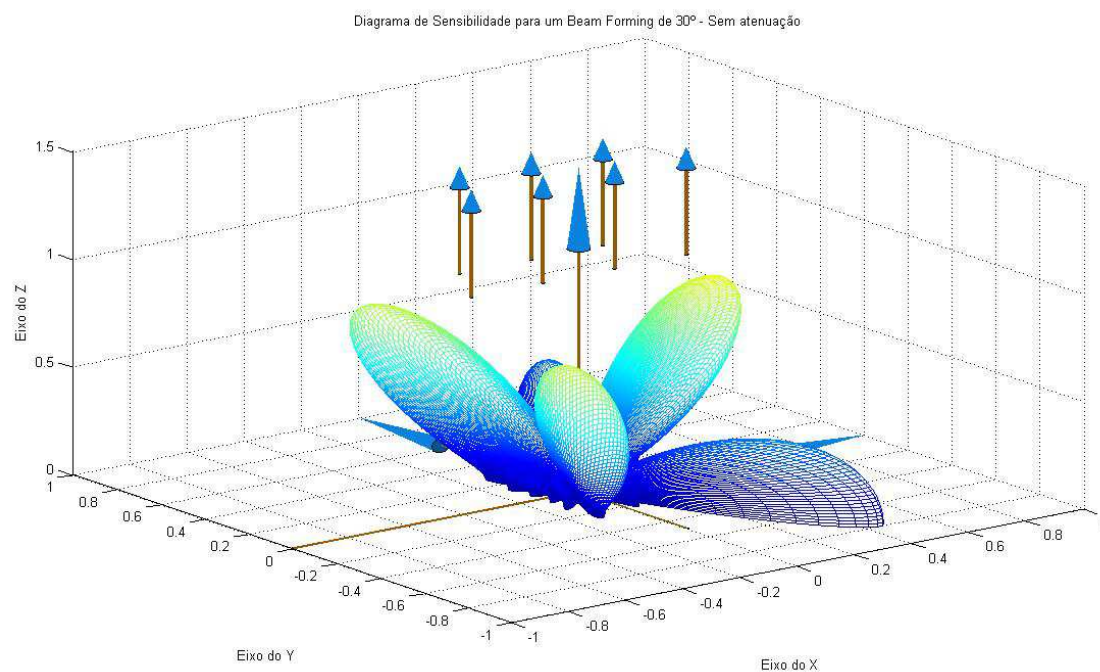


Figura 3.10: Gráficos do diagrama de sensibilidade do array para um Beam Forming de 30° sem atenuação.

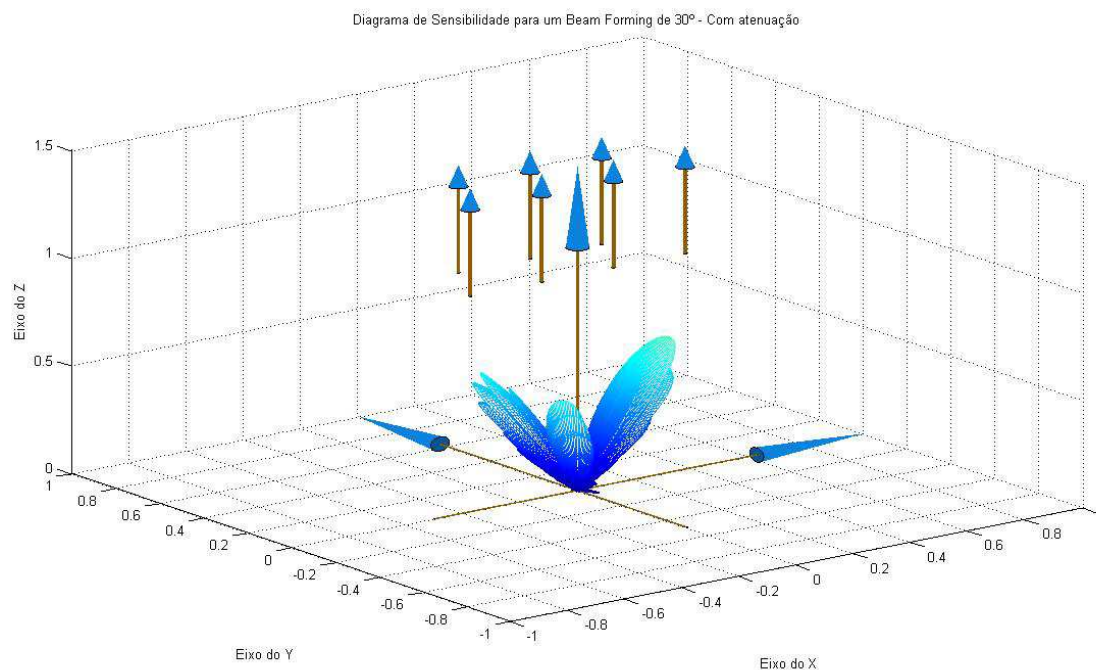


Figura 3.11: Gráficos do diagrama de sensibilidade do array para um Beam Forming de 30° com atenuação.

Capítulo 4

Sonar ultra-sónico para pequenos robots

4.1 Apresentação e descrição do sistema implementado

De seguida procede-se à apresentação e descrição do sistema projectado, resultante da execução do trabalho. O Sistema baseia-se em três fases principais, sendo elas a transmissão, a recepção e a computação. Estas fases contêm no entanto vários estados cada, nomeadamente os estados com o mesmo nome da fase a que correspondem e estados de inactividade aparente do sistema.

O sistema inicia na fase de transmissão, na qual envia para o meio em frente ao array, um sinal ultra-sónico com $40kHz$ de frequência. De seguida, este aguarda inactivo, um período de tempo necessário para evitar a existência de interferência directa do emissor para os receptores. Seguidamente, inicia-se a fase de recepção, na qual se efectua a amostragem durante um tempo correspondente ao alcance que se pretende ter no sonar. Todos os valores amostrados são armazenados em vectores na memória do *Digital Signal Processor (DSP)*.

No Futuro, na terceira fase o sistema após a amostragem processa o necessário para construção do mapa digital e ao mesmo tempo aguarda o tempo necessário, para evitar a recepção de ecos vindos de possíveis obstáculos mais distantes. No entanto, no estado actual do projecto, são passados os dados da memória do *DSP* para o *MATLAB* e o processamento necessário ao beam forming para os ângulos desejados é realizado “*offline*”, assim como a construção do mapa digital. Na Figura 4.1 está representado o esquema das três fases principais, assim como, a cor-de-laranja o estado actual do sistema, e a azul o estado a implementar no Futuro.

Quanto ao hardware, foram montadas e/ou ligadas 5 placas diferentes, nomeadamente a placa do *kit eZdsp*, a *locus board*, o *extensão da locus board*, o *circuito de apoio ao array* e a *placa com o array*, necessárias nesta primeira abordagem ao hardware, para colocação em funcionamento do sistema. O diagrama presente na Figura 4.2 descreve de uma forma sucinta, as interacções entre as placas e o funcionamento de um modo geral. É de referir, que no acondicionamento do sinal está englobado a *placa com o array* e a placa de apoio ao mesmo.

De seguida, será explicado com maior pormenor, cada termo ou procedimento atrás mencionado.

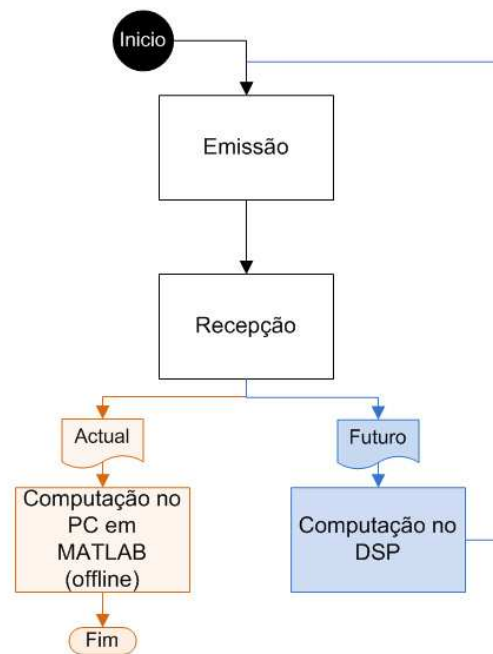


Figura 4.1: Esquema das principais fases do sistema com indicação do estado actual e o Futuro.

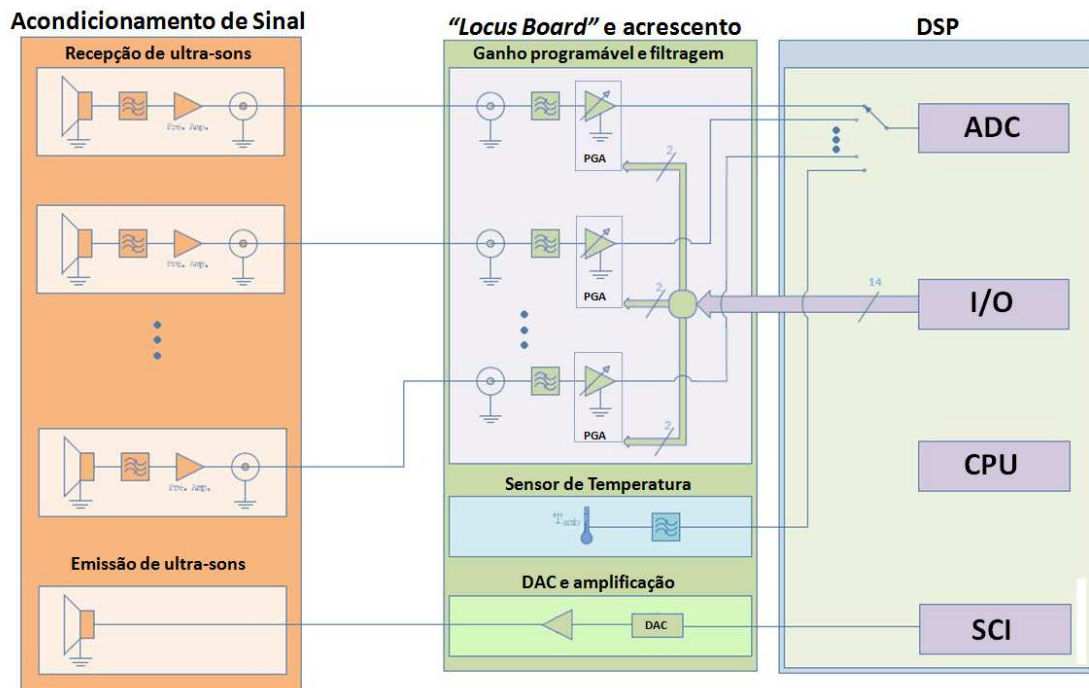


Figura 4.2: Diagrama do hardware (Fonte: adaptado de [5]).

4.2 Sensores piezoelétricos de ultra-sons

Um dos objectivos em análise neste projecto é o uso de transdutores baratos e com pouca precisão na construção do mesmo. Os transdutores receptores usados foram os *400SR10B* e os transmissores os *400ST10B* da *PROWAVE* (Figura 4.3 a)). Segundo os dados do fabricante, possuem uma frequência central de funcionamento de 40kHz , como se pode verificar no gráfico de sensibilidade de nível de pressão sonora em função da frequência, presente na Figura 4.3 c)) e um feixe de mais ou menos 60° a -3dB , como se pode verificar pelo diagrama de sensibilidade presente na Figura 4.3 b). Na análise teórica da resposta do array usou-se, não os valores do diagrama da Figura 4.3 b), mas sim os de um estudo efectuado em anos anteriores na câmara anecóica do DETI, presente na Figura 4.4 [17].

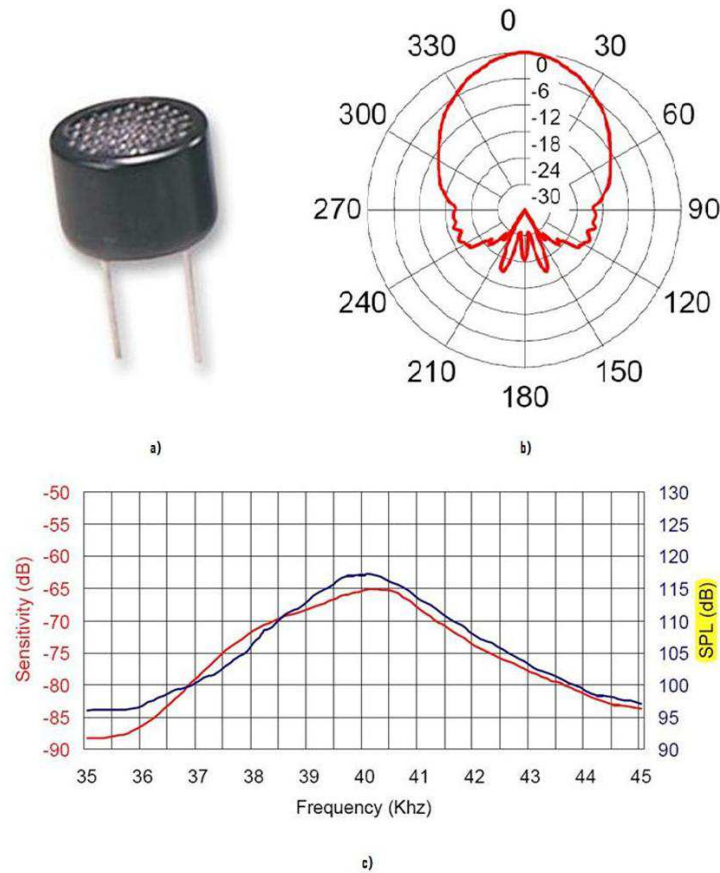


Figura 4.3: Características do transdutor 400SR10B: a) aspecto físico; b) diagrama de sensibilidade; c) diagrama de sensibilidade e nível de pressão acústica (Fonte: [18]).

4.3 DSP

DSP, do inglês *Digital Signal Processor*, são processadores embutidos especializados em processamento de sinais áudio, vídeo, etc. Possuem uma grande capacidade de processamento, podendo trabalhar em tempo real ou offline. Estes microprocessadores têm ainda,

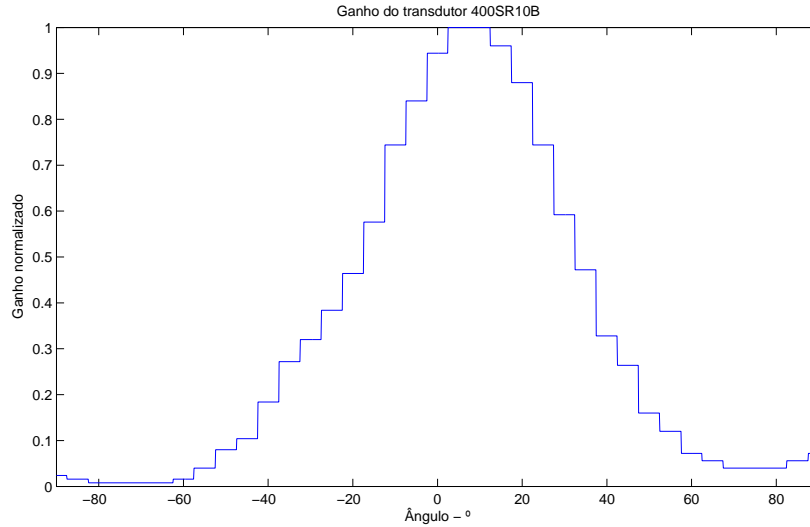


Figura 4.4: Diagrama de sensibilidade do transdutor 400SR10B para 40 kHz, medido na câmara anecóica (Fonte: [17]).

grandes desempenhos e eficiência na execução de instruções complexas, como por exemplo, Transformadas Rápidas de *Fourier* (*FFT*), filtros digitais e multiplicações e acumulações (MAC) numa instrução só.

No presente projecto foi usado o kit de desenvolvimento *TMX320F2812 eZdsp* da *Texas Instruments*, Figura 4.5. Para além do DSP *TMX320F2812* de 150 milhões de instruções por segundo, possui também na placa a alimentação, expansões I/O, memórias Flash, ligações para as entradas da ADC, porta série (SPI), e porta paralela para ligação ao PC.

O kit em questão vem acompanhado de software da *Texas Instruments*, mais concretamente o programa *Code Composer Studio*, que funciona como editor, compilador e ainda permite carregar o programa para a memória do DSP. Comporta igualmente modos de *debug*, como por exemplo, análise de variáveis, vectores, visualização de zonas de memória e construção de gráficos. O aspecto geral da janela de trabalho do programa é apresentado na Figura 4.6.

4.4 Software de aquisição de sinais com DSP

O software utilizado no DSP para os testes que executámos é extremamente simples, visto que nesta fase de desenvolvimento do agregado, apenas se pretender realizar a aquisição de sinal. O sistema começa por iniciar as drives dos periféricos, criar variáveis, vectores e coloca o sistema em estado de transmissão. Depois disto, entra em ciclo infinito, durante o qual só atende os serviços às interrupções do timer, serviços estes, que são usados para o procedimento de escalonamento dos estados do sistema.

Num âmbito geral, a programação efectuada no DSP foi somente, programar as interrupções para ocorrerem com uma frequência de 320 kHz, emitir um sinal, esperar um determinado tempo e adquirir os sinais recebidos transdutores. Primeiro foram usadas interrupções com uma frequência de 320 kHz porque, o mesmo serviço de rotina à interrupção foi usada

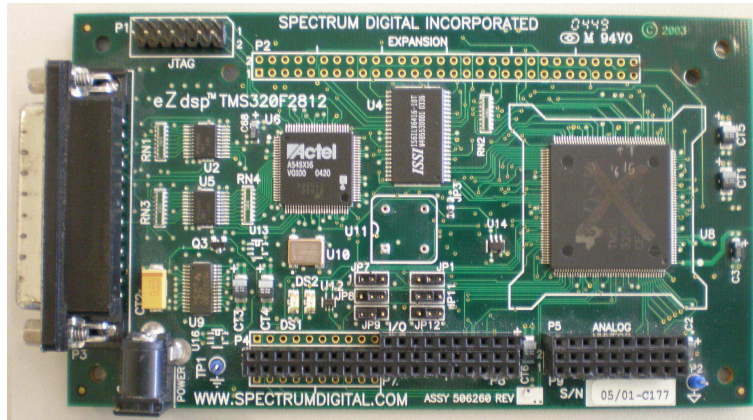


Figura 4.5: Aspecto da placa que compõe o kit TMX320F2812 eZdSP da TI.

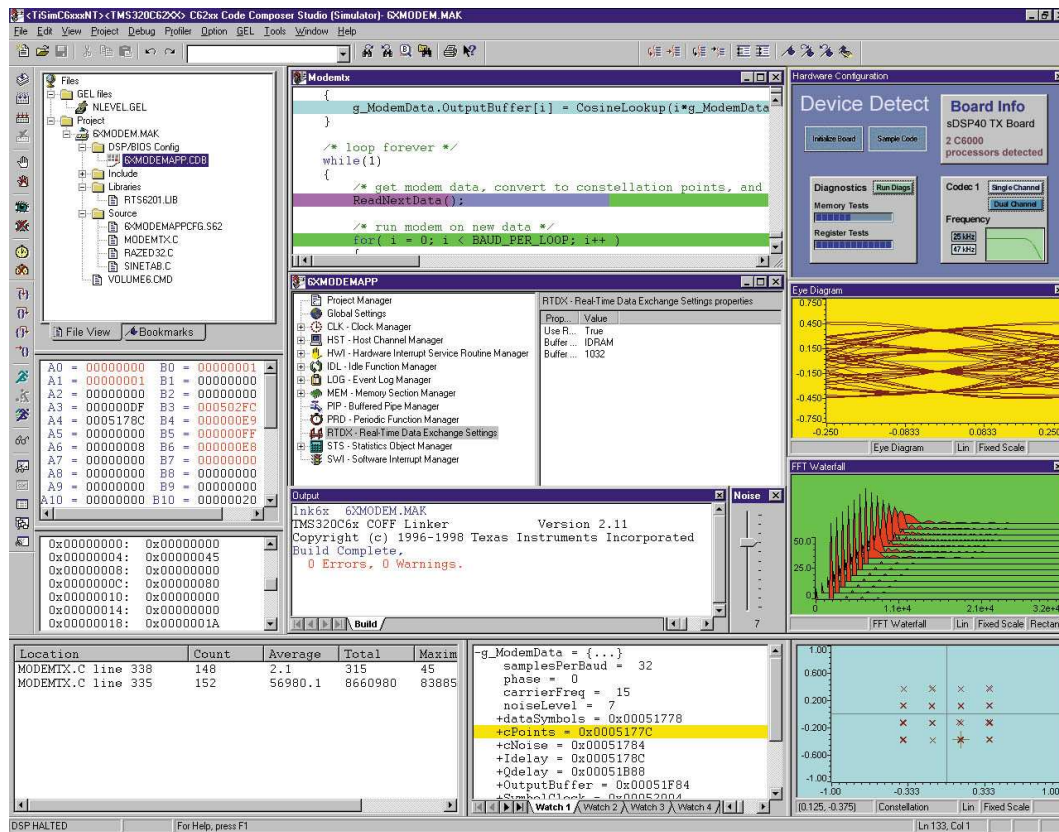


Figura 4.6: Aspecto do Code Composer Studio e de algumas das suas janelas.

para execução dentro dos vários estados do sistema. Como tal, a onda resultante da DAC tem melhor estabilidade quando executa mais conversões por unidade de tempo, e como se necessitava de uma onda de 40 khz decidiu-se que por cada período de onda haveria 8 conversões da DAC. O sinal enviado para a DAC foi uma onda quadrada de $320kHz$ o que permite que possua maior energia, do que por exemplo para ondas triangulares, ou sinusoidais com a mesma amplitude.

Toda a computação usada para os ensaios é efectuada, como já dito anteriormente, no serviço à interrupção, como se de uma máquina de estados se tratasse. Inicialmente, o sistema está em estado de transmissão (TX) onde são enviados para a DAC vários valores, previamente calculados, através da SPI (*Serial Peripheral Interface*). Isto ocorre durante um certo período de tempo, no nosso caso $800\mu s$, passando depois para o estado de espera para evitar a interferência directa entre o emissor e os receptores (ID). No estado de espera, o sistema encontra-se somente em espera sem executar nada de concreto. A seguir ao estado de ID, de cerca de $1560\mu s$, o estado do sistema é mudado para o estado de recepção, ou RX.

Durante os $9284\mu s$, tempo de duração do estado de recepção, o sistema amostra os sinais recebidos do ambiente desde um alcance de 0.4056 metros até um alcance de 2 metros. Depois deste tempo, o estado é actualizado para o estado de segurança, ou SEG, que não é mais que um tempo de espera de $3464\mu s$, usado para evitar a interferência na nova recepção de ecos vindos de objectos que se encontrem a mais de 2 metros do array. Este tempo é o correspondente a 1 metro de alcance e serve para evitar que ecos vindos de possíveis obstáculos que se situem no metro imediatamente a seguir à distância limite do sonar. Ao tempo correspondente ao metro de alcance é subtraído o tempo usado para a emissão e o usado para evitar interferência directa da próxima emissão.

Numa fase futura do projecto após este estado o sistema retorna novamente ao estado TX recomeçando novamente todo o processo atrás descrito. Este ponto não implementado pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 4.8 a cor vermelha. O diagrama do esquema de software enunciado está presente nas Figuras 4.7 e 4.8.

É de salientar que todos estes parâmetros de tempos e alcances podem ser alterados, mudando simplesmente o tempo em que o sistema se encontra nos estados.

4.5 Amostragem de segunda ordem

Como forma de diminuirmos o tamanho dos sinais recebidos a ter em memória e conseguirmos executar facilmente atrasos de fase num sinal, foi usado o critério de amostragem de ordem superior, mais concretamente o de segunda ordem. A amostragem de segunda ordem, permite trazer os sinais para banda base e decimá-los ao mesmo tempo, de maneira rápida e sem cálculos adjacentes, somente pelo aproveitamento de algumas amostras necessárias de um sinal, seguindo um simples algoritmo [19].

O método só pode ser executado, quando o teorema de *Nyquist* é respeitado, portanto somente para amostragens com frequências iguais ou superiores ao dobro da largura de banda do sinal. A implementação do método pressupõe a obtenção de duas amostras espaçadas de 90° em cada período de amostragem. Isto quer dizer que se obtém uma amostra de um sinal espera-se um quarto do período da portadora e obtém-se uma segunda. As próximas duas amostras são obtidas, no mínimo, no próximo período de onda ou num qualquer múltiplo deste.

Contemplando a possibilidade de decimação, o período de amostragem do sinal será dado

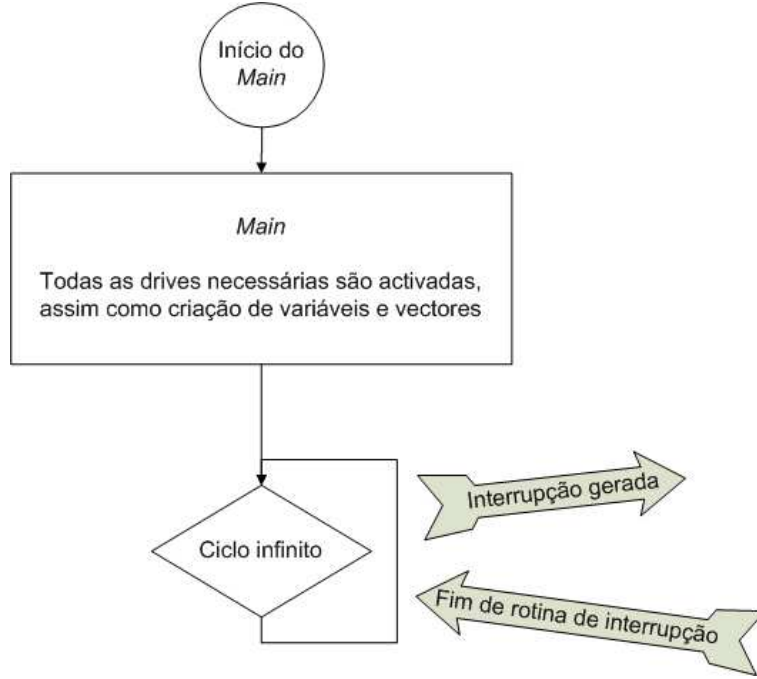


Figura 4.7: Diagrama geral de fluxo do software da função *Main* implementada no DSP.

pela expressão da Equação 4.1, sendo $(n - 1)$ o factor de decimação, f_0 a frequência da portadora do sinal.

$$T_{2nd} = \frac{n}{2f_0} \quad (4.1)$$

Depois da primeira amostra, chamada Fase é amostrada a Quadratura, um quarto de onda depois, como se pode observar pela expressão do tempo de espera entre as amostragens das componentes, dada pela Equação 4.2.

$$\nu = \frac{1}{4f_0} \quad (4.2)$$

No nosso caso a frequência do sinal é de 40KHz e a de amostragem é de 320KHz, portanto respeita o *teorema de Nyquist*. De referir que, como a frequência de amostragem é 8 vezes superior à da onda, faz com que tenhamos uma amostra como Fase e duas depois desta, uma correspondente à Quadratura. Como primeira fase do trabalho realizado, o sinal era todo amostrado a 320KHz, e depois retiradas no *MATLAB* as amostras de fase e quadratura correspondentes, como exemplifica os gráficos da Figura 4.9 [19], [20], [21], [22] e [23].

A obtenção de um sinal expresso em fase e quadratura, faz com que qualquer atraso (ϕ) de fase possa ser feito pela simples multiplicação do sinal $Fase + j * Quadratura$ com $e^{-j\phi}$.

4.6 Locus Board

A “*locus board*” é uma placa desenvolvida em anos anteriores [17], com a finalidade de acomodar várias funcionalidades relacionadas com projectos desenvolvidos no DETI, com o uso de ultra-sons. Entre várias funções, a placa tem a responsabilidade de fazer a ligação entre

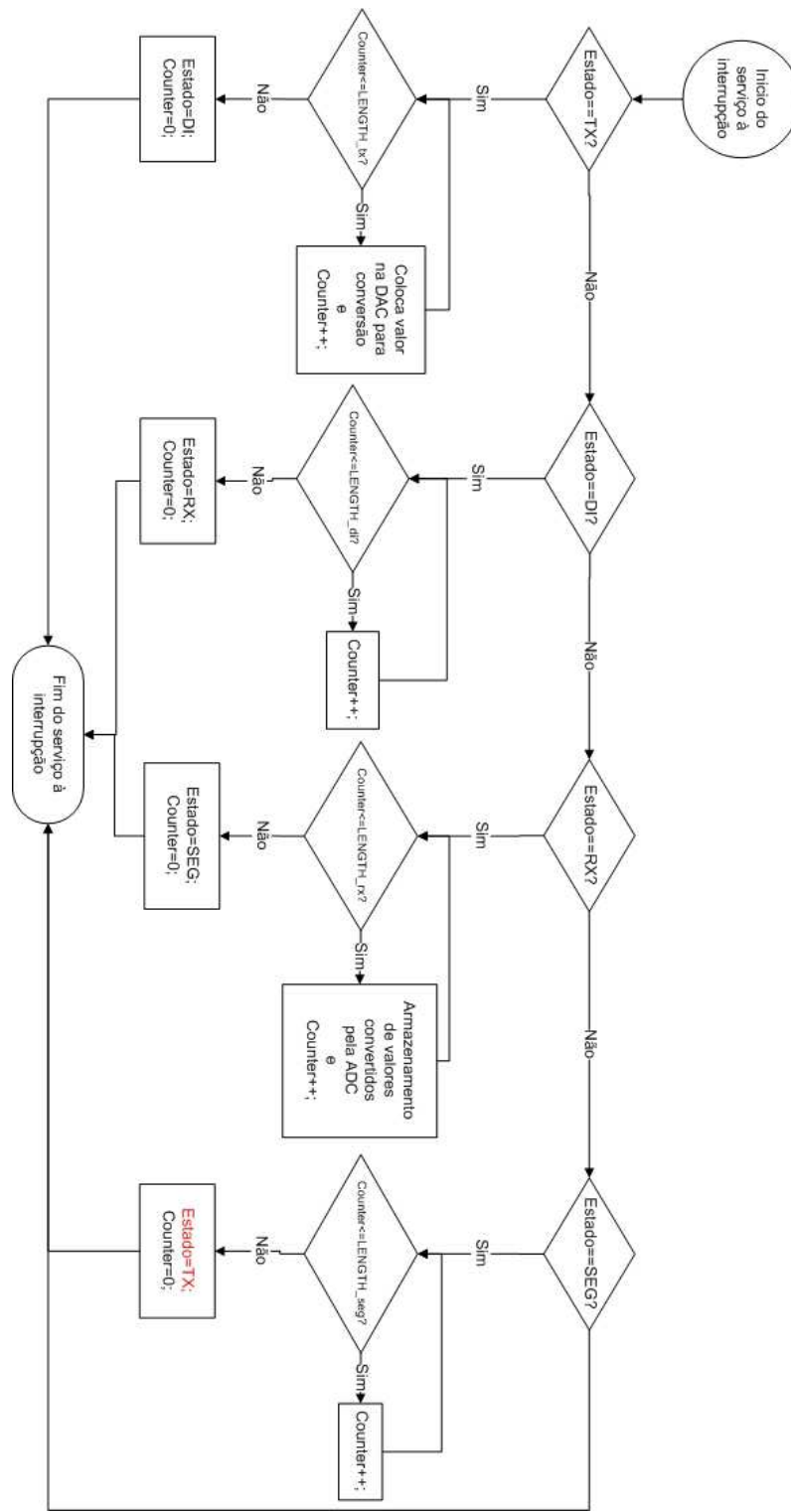


Figura 4.8: Diagrama geral de fluxo do software dos estados referentes ao serviço à interrupção implementado no DSP.

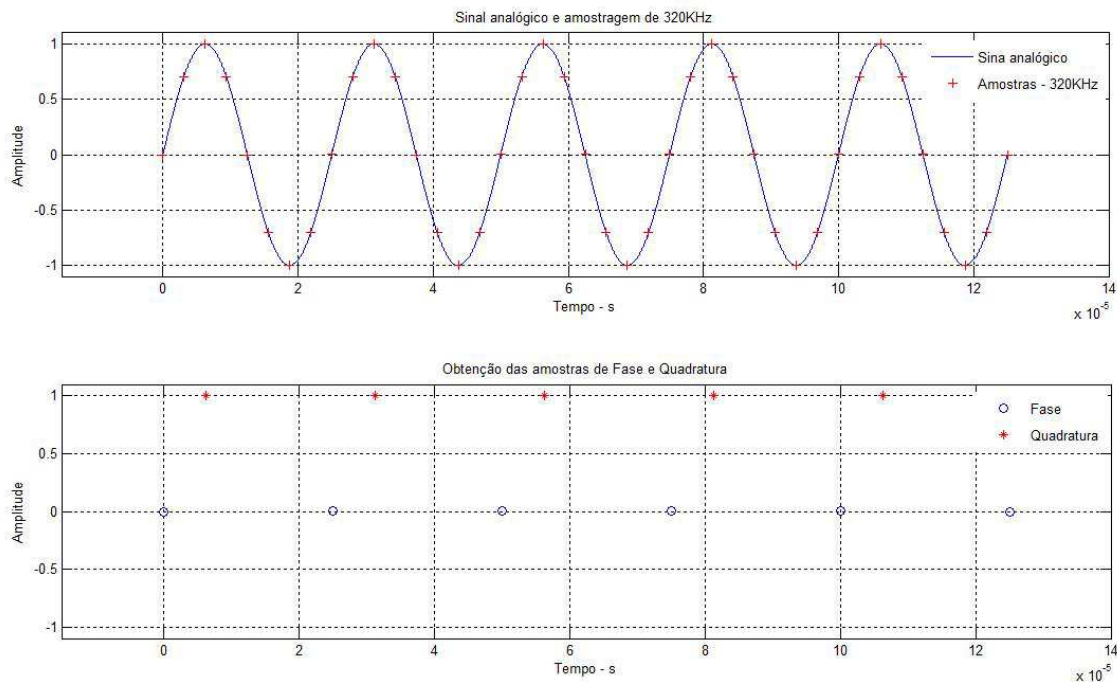


Figura 4.9: Cima: Sinal analógico e sua amostragem; Baixo: Amostras de Fase e Quadratura do sinal adquirido.

os emissores e receptores de ultra-sons e o kit do DSP. A “*locus board*” possui igualmente um andar de ganho programável, com 4 níveis de amplificação, possuindo ainda um filtro passa-banda, para filtrar o sinal a amplificar. Relacionado com o nosso projecto possui ainda um sensor de temperatura construído com o componente LM35, que possibilitará o ajuste da velocidade do som relativamente à temperatura e uma DAC de 12 bits com 8 saídas. Comporta ainda a amplificação para os sinais das saídas da DAC e disponibilidade de grande parte dos sinais disponíveis na placa do kit da DSP, assim como ligações usando fichas USB para os módulos de transmissão e recepção de ultra-sons e ligações com as entradas da ADC. Possui igualmente outras funcionalidades, como possibilidade de comunicação via porta série e acoplamento de módulo de rádio frequência, não utilizado neste projecto. A placa possui ainda um módulo de alimentação para todos os componentes presentes nesta.

O projecto da “*locus board*” é praticamente igual ao desenvolvido em anos anteriores, somente foram corrigidas especificações para possibilidade de impressão, assim como modificação de sinais presentes em ligações, nomeadamente sinais de output e entradas de ADC e ainda a correcção do módulo que comporta a DAC [5]. Neste último somente foram acrescentados condensadores acoplados à entrada do sinal de tensão de referência, erro este detectado depois de um breve estudo do funcionamento prático da DAC. O aspecto final da *locus board* impressa e montada este ano, é visível na Figura 4.10, podem ainda ser consultados o esquema eléctrico e o seu layout no Anexo A.2. É de salientar que esta placa poderá ser usada por outros alunos para diversos projectos que necessitem da utilização de ultra-sons e da DSP. Para este projecto só será necessário utilizar da *locus board* a DAC, a amplificação para sinais vindos da mesma, o ganho programável dos 4 canais que possui, o módulo de temperatura (embora não usado nesta fase), as 4 fichas USB, 6 sinais de output e 8 entradas da ADC (7

para os elementos do array e 1 para o módulo da temperatura) .

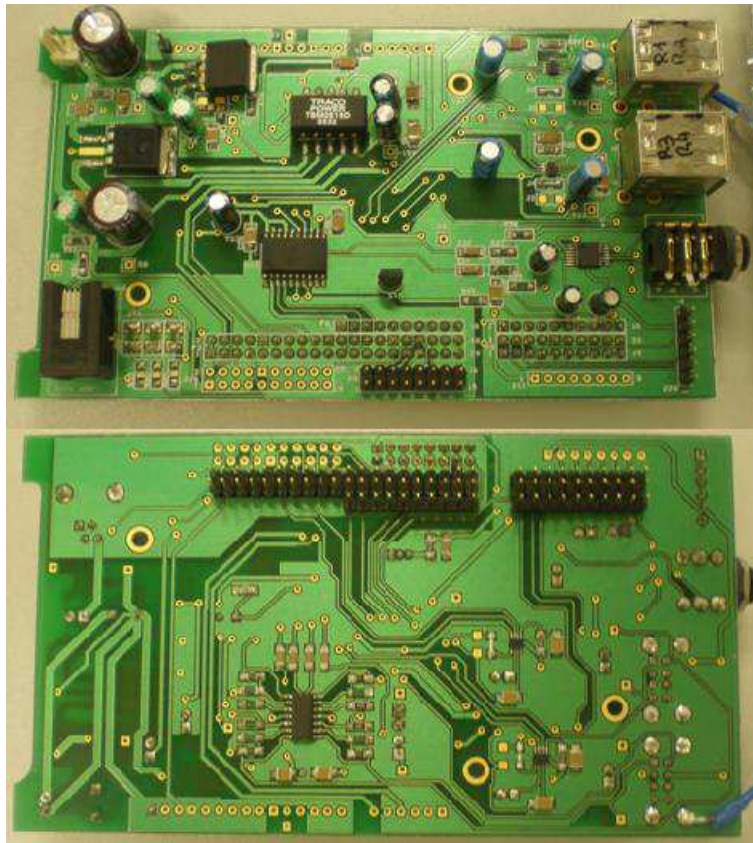


Figura 4.10: Aspecto final da placa *locus board*, frente e verso, respectivamente cima e baixo.

4.7 Extensão da *locus board*

O projecto, comportando um array de 7 elementos e tendo a *locus board* somente 4 entradas com tratamento de sinal disponível, foi necessária a construção de uma extensão de mais 3 sistemas de filtragem e ganho programável.

Esta placa que posteriormente foi colocada ao lado da *locus board* e que se liga a esta através dos pinos dos sinais digitais e entradas da ADC disponíveis para o efeito, seguiu o mesmo esquema eléctrico dos vários módulos de amplificação que a *locus board* contém. O aspecto final da placa pode ser visto na Figura 4.11, assim como as suas ligações à *locus board* e a placa de platex que acomoda ambas. O seu esquema eléctrico, assim como o layout construído no ORCAD podem ser consultados no Anexo A.3.

4.8 Circuito de apoio ao array

Para a existência de uma melhor relação sinal/ruído é aconselhável que a filtragem e amplificação sejam efectuadas o mais perto possível da antena receptora do sinal. No nosso caso o dispositivo que recebe o sinal é o array, portanto o sistema com a finalidade atrás

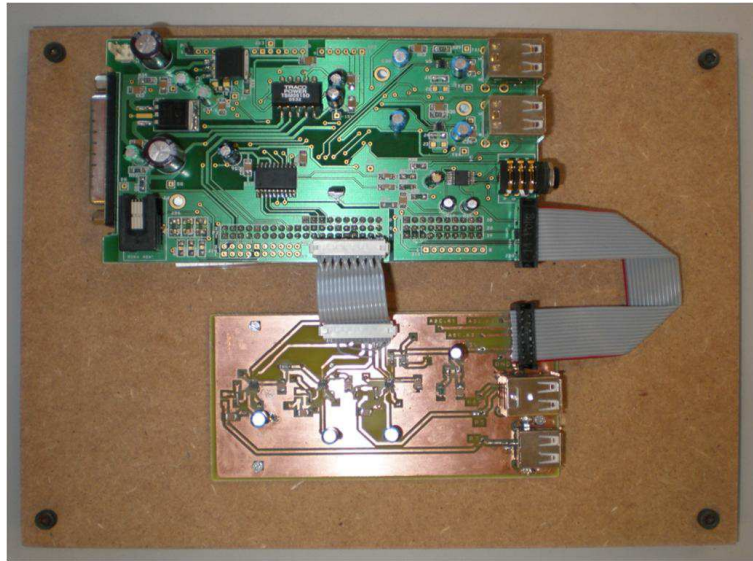


Figura 4.11: Aspecto final da placa com a extensão da *locus board* e seu suporte.

mencionada deve ficar o mais perto possível deste. Assim sendo, foram construídos 7 módulos de acondicionamento de sinal, nomeadamente filtragem e amplificação dos sinais que chegam a cada transdutor [5].

Os sinais depois de convertidos para tensão pelos transdutores, possuem uma componente DC, componente esta que o condensador à entrada do sistema de acondicionamento vai retirar, ficando os sinais em torno de 0. Posteriormente os sinais são amplificados cerca de 30 vezes por um amplificador inversor, sinais estes, que depois são ligados à *locus board* e à sua extensão por meio de 7 cabos USB blindados de 3 metros cada. O suporte que contém o array assim como a placa que tem o acondicionamento de sinal têm o aspecto mostrado na Figura 4.12. O seu esquema eléctrico e o layout podem ser visualizados no Anexo A.4.

Para tentar evitar a ocorrência de ecos no suporte do array que posteriormente iam outra vez em direcção aos obstáculos, foi usada uma esponja no revestimento dessa superfície. Isto foi efectuado devido ao efeito atrás explicado ter sido verificado experimentalmente, principalmente para obstáculos que se encontravam perto do array. Depois de vários materiais testados, nomeadamente tecido de algodão, papel, algodão e esponja, foi escolhida a esponja por ser de fácil aplicação e ter uma boa eficiência (similar à do material estudado com melhor eficiência, o algodão). De referir que provavelmente um material específico para isolamento sonoro poderia ter um melhor desempenho, no entanto o desempenho demonstrado pela esponja foi considerado suficiente. Considera-se assim de extrema utilidade e suficiente este tipo de esponja usada. A montagem da esponja pode ser observada na parte inferior da imagem da Figura 4.12, a negro e devidamente referenciado. De referir ainda, que todos os layouts das placas a imprimir, foram realizados no programa ORCAD 9.1.

Um aspecto geral do hardware montado, pode ser visualizado na Figura 4.13.

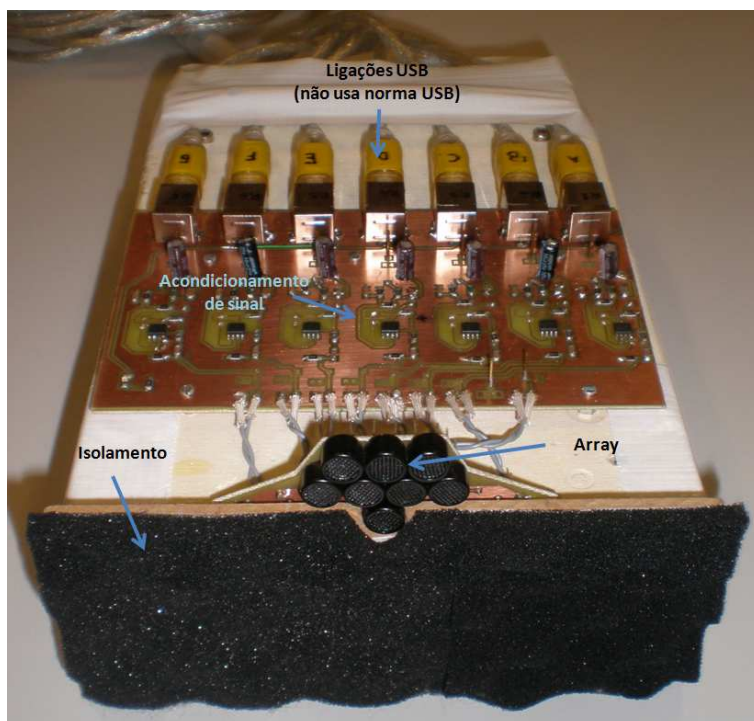


Figura 4.12: Aspecto final do módulo que suporta o array e seu acondicionamento de sinal.

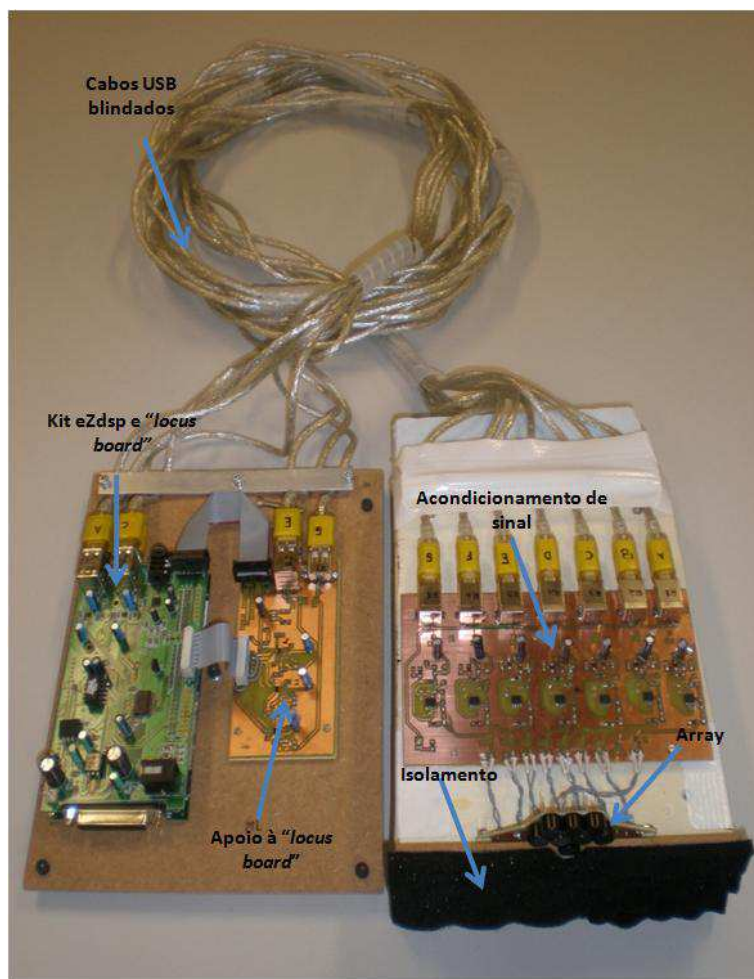


Figura 4.13: Aspecto final do hardware completo e interligado.

Capítulo 5

Testes e resultados

5.1 Estudo da DAC

Depois de um breve estudo da DAC de uma versão mais antiga da *locus board*, resultante de uma introdução prática ao manuseamento da mesma, verificou-se que não funcionava correctamente. O problema residia no facto de as tensões práticas que se obtinham nas saídas da DAC, não corresponderem aos códigos introduzidos para geração das mesmas, como observável no gráfico da Figura 5.1. Depois de uma análise ao datasheet da DAC (TLV5630), verificou-se que faltavam dois condensadores ligados ao pino de tensão de referência. Estes provavelmente foram negligenciados devido ao facto de se estar a usar tensões de referência internas, ou seja, seleccionáveis através da alteração de bits na memória do componente. No entanto procedeu-se à alteração do esquema da *locus board* e como se pode verificar no gráfico da Figura 5.2, a DAC encontra-se neste momento a funcionar correctamente.

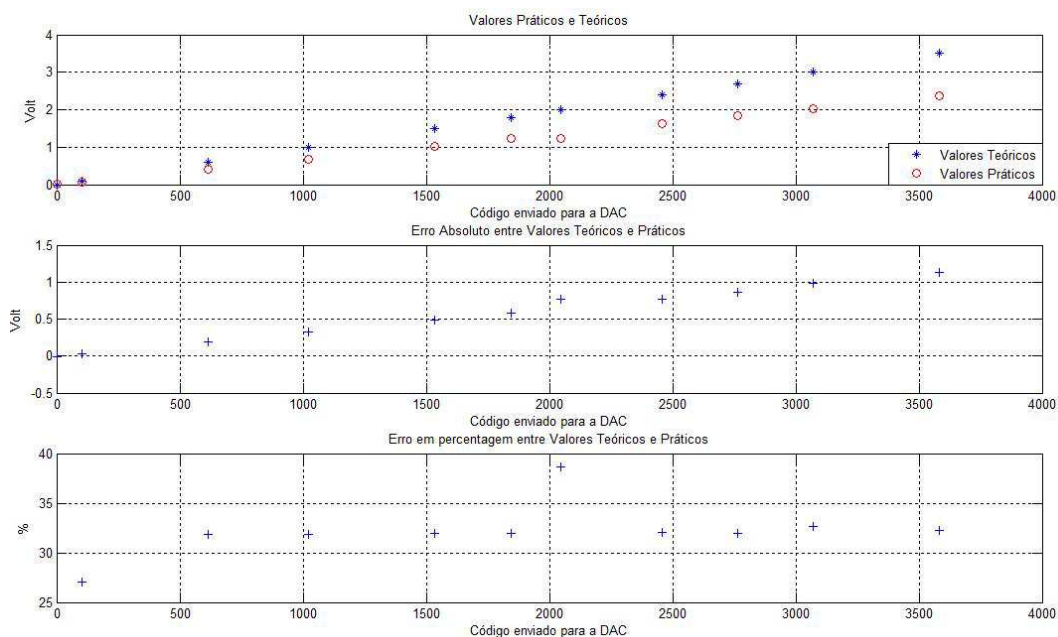


Figura 5.1: Gráficos com resultados do estudo da DAC na versão anterior da *locus board*.

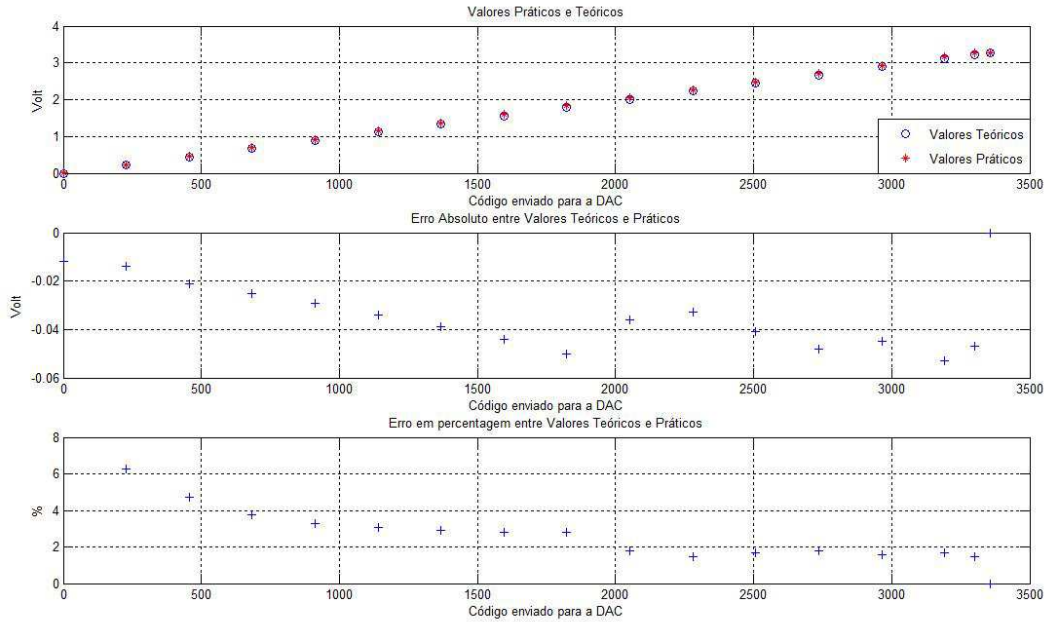


Figura 5.2: Gráficos com resultados do estudo da DAC na nova versão da *locus board*.

5.2 Medição do diagrama de sensibilidade do array de ultra-sons

Com a finalidade de verificar se o array de 7 elementos tinha um comportamento prático semelhante ao obtido teoricamente, realizou-se um ensaio de sensibilidade na câmara anecóica do DETI. Os elementos do array foram ligados a uma placa construída num projecto anterior, presente na Figura 5.3 b), que efectua a amplificação e a soma analógica dos sinais [17]. O seu esquema eléctrico pode ser consultado no Anexo A.5.

No ambiente controlado da câmara, foi efectuado o ensaio para várias elevações e azimutes, de acordo com as indicações na Figura 5.3 a). A montagem era formada por um gerador de sinais que estava ligado a um transdutor emissor, colocado numa extremidade da câmara, e na outra extremidade existia o array preso a uma suporte com possibilidade de sofrer elevação, e que por sua vez estava num eixo rotacional que permitia varrer os 180° de azimuth analisados. O array por sua vez estava ligado à placa amplificadora e somadora, sendo o valor de tensão pico a pico da onda resultante, medido num osciloscópio. O esquema da montagem pode ser observado na Figura 5.4.

Os ensaios na câmara anecóica foram efectuados para azimutes de -90° a 90° , com espaçamento de 3 em 3 graus e elevações de -40° , -30° , -20° , -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° e 14° . Como se pode observar, analisando as Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 o array tem um comportamento semelhante ao teórico para elevações entre -15° e 14° . De reter, que embora o comportamento seja idêntico, o módulo do ganho prático não é semelhante ao teórico. Esta disparidade pode dever-se ao facto de os transdutores usados serem baratos, variando portanto ligeiramente as características de transdutor para transdutor, pelo que a função de atenuação usada para obtenção do diagrama teórico foi obtida com base num único transdutor e que não foi usado no array. No entanto, o estudo acima descrito, foi de extrema utilidade para percebermos o

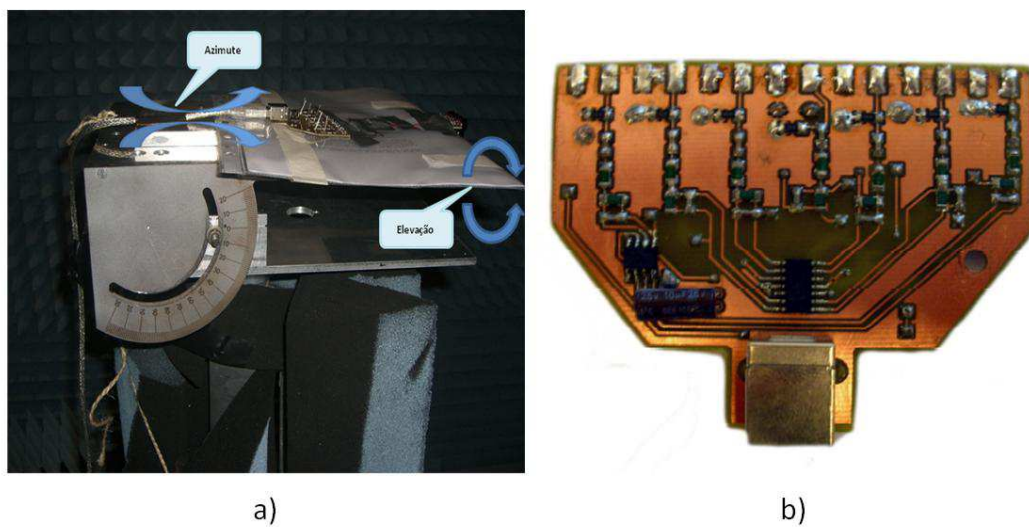


Figura 5.3: a) Plataforma de elevação e azimuth; b) Placa de amplificação e soma de sinais. (Fonte: [17])

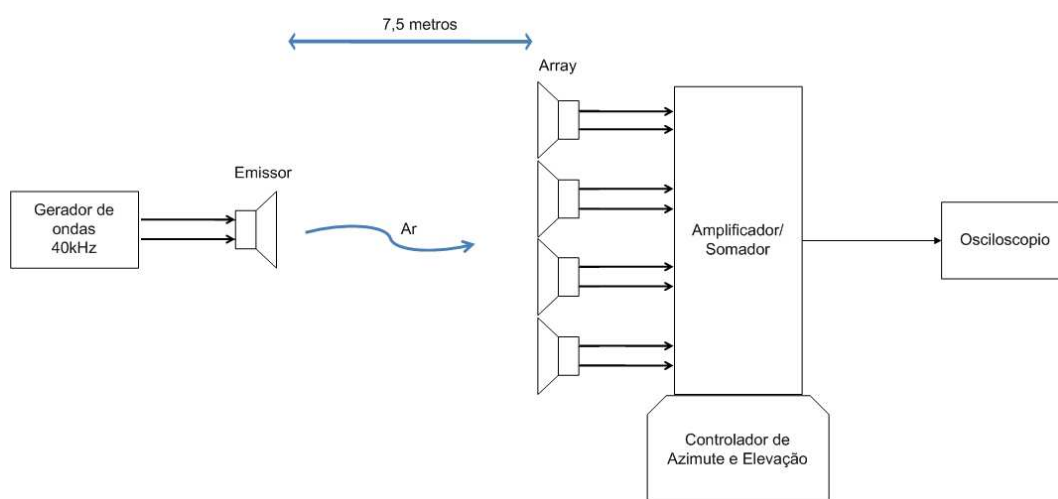


Figura 5.4: Esquema da montagem usada na câmara anecóica.

correcto funcionamento dos vários transdutores como um array. Os gráficos das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 têm como eixo do Y o nome de módulo do ganho normalizado, que na realidade é a intensidade de sinal que o array recebeu da direcção (azimute) correspondente em graus. Os valores apresentados são normalizados, visto que os valores teóricos de ganho para as diversas direcções foram determinados como sendo entre 0 e 1. Portanto, os valores práticos obtidos na câmara anecóica foram divididos pelo seu valor máximo, ficando assim igualmente com valores entre 0 e 1.

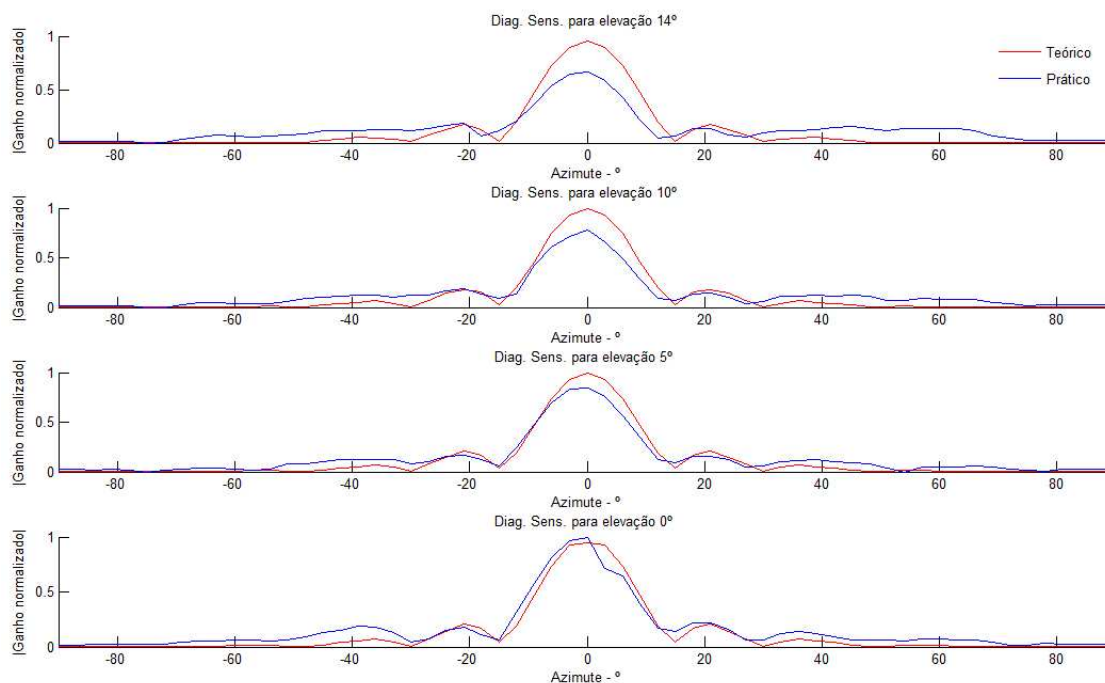


Figura 5.5: Gráficos com diagrama de sensibilidade para elevações 14°, 10°, 5° e 0°.

Embora nem todos os ganhos estivessem de acordo com o teórico, o sistema final testado neste projecto usa somente a elevação 0°, pelo que pode-se observar claramente a perfeita semelhança de comportamento do diagrama prático com o teórico, exceptuando uma questão de offset que os valores práticos possuem. A informação dos diagramas não é apresentada como por exemplo os da Figura 3.9 em 3D, pelo facto de se possuir poucos dados práticos comparativamente com os obtidos teoricamente, facto que provocaria uma fraca interpretação do mesmo em 3D.

5.3 Comparação dos resultados da câmara anecóica com o diagrama de sensibilidade

Nesta secção são comparados os resultados da câmara anecóica para o array construído com o diagrama de sensibilidade teórico. Restringiram-se os azimutes aos que correspondem aos ângulos de Beam Forming que se utiliza na prática, ou seja de -30° a 30° e as elevações às que os resultados práticos possuem o mesmo comportamento que os teóricos. Como se pode observar pelos gráficos da Figura 5.8 e da Figura 5.9, o erro absoluto máximo entre os valores

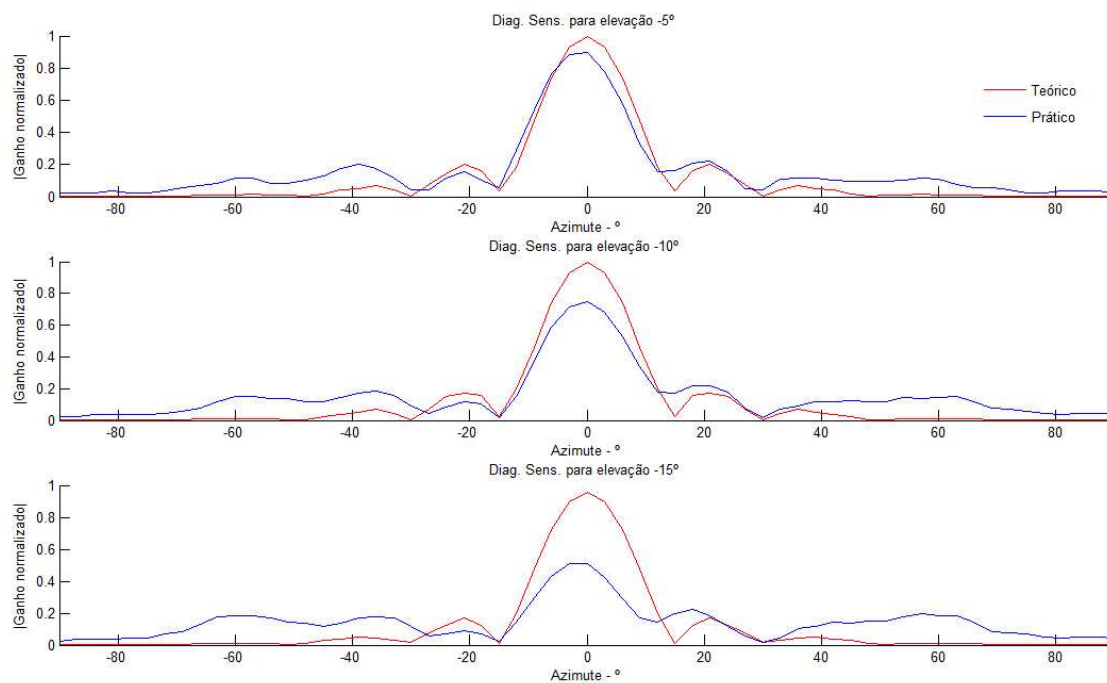


Figura 5.6: Gráficos com diagrama de sensibilidade para elevações -5°, -10° e -15°.

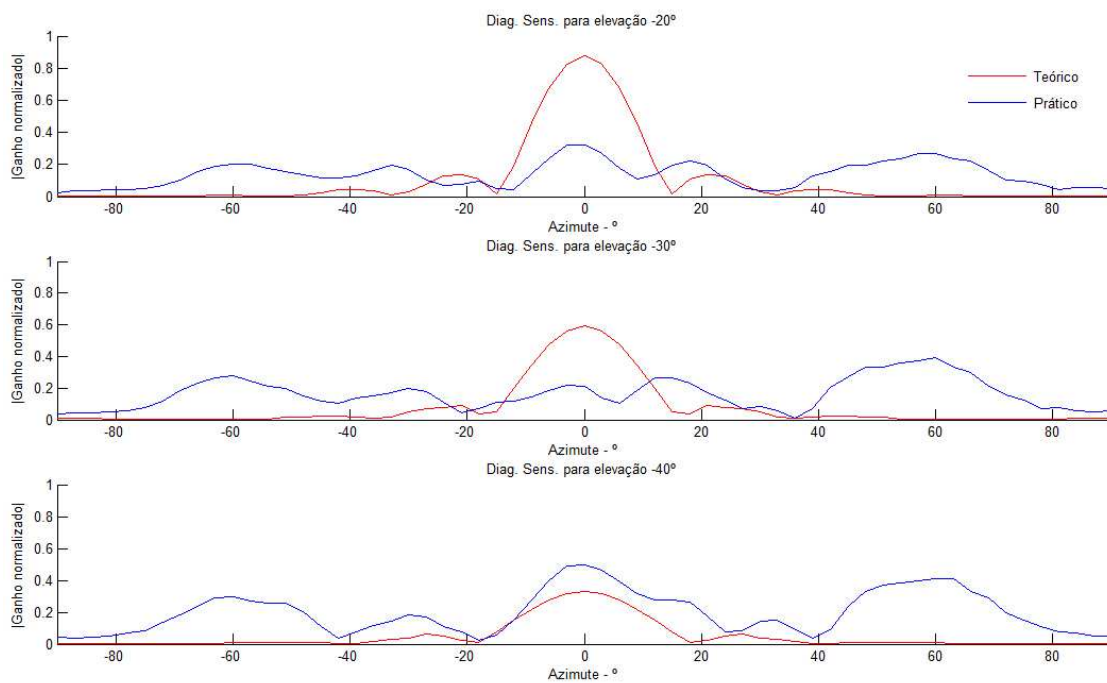


Figura 5.7: Gráficos com diagrama de sensibilidade para elevações -20°, -30° e -40°.

práticos e teóricos do módulo do ganho normalizado, que se obtiveram para os dados recolhidos na câmara anecóica, é de 0.4731. Este erro máximo acontece para uma elevação de 15° . Para as elevações -5° , 0° e 5° , verifica-se os menores erros ao longo dos azimutes, não passando estes do valor 0.2177. Embora o erro pareça ser bastante significativo, o comportamento do diagrama é semelhante ao prático, como já dito anteriormente. Para melhor percepção do que está a ser dito, obteve-se os gráficos presentes na Figura 5.10, com os gráficos teóricos e práticos normalizados a 1, onde se percebe perfeitamente a semelhança entre eles. Nesta normalização, foram divididos os valores teóricos e práticos a apresentar para cada elevação, pelo seu valor máximo teórico e prático, respectivamente. Deste modo os valores ficaram com a máxima amplitude igual, podendo desta forma perceber melhor os seus comportamentos. Como o processo na câmara anecóica está sujeita a erros humanos e materiais, verifica-se por exemplo, ligeiros desfasamentos dos gráficos, assim como um ligeiro offset para os valores do módulo do ganho normalizado mais baixos.

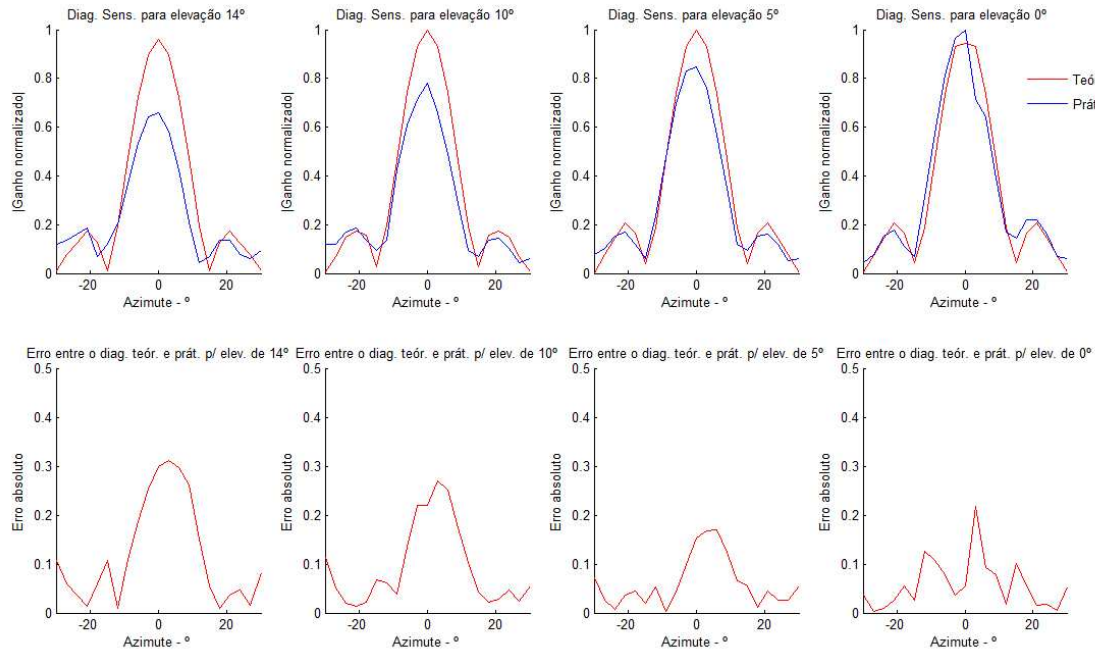


Figura 5.8: Gráficos com diagrama de sensibilidade para várias elevações e erro associado.

5.4 Testes práticos em ambientes com obstáculos

Como teste do projecto em análise, para este ano, foram realizados vários ensaios práticos com diferentes cenários de obstáculos, assim como testes no “ar” e próximo do solo.

Devido ao sistema implementado não possuir meios de anulação do eco resultante do solo, foram executados testes a uma altura de cerca de 83.2 cm, para uma posterior comparação com os valores recolhidos com o array perto do solo. Nesta fase do trabalho, pensava-se que com o array tão baixo, o sistema estaria sujeito a um maior ruído de sinal proveniente nas reflexões do sinal no solo. O array foi colocado na extremidade de uma mesa redonda, com uma área desimpedida de objectos de cerca de 3 metros, para os 180° em frente do array. Os

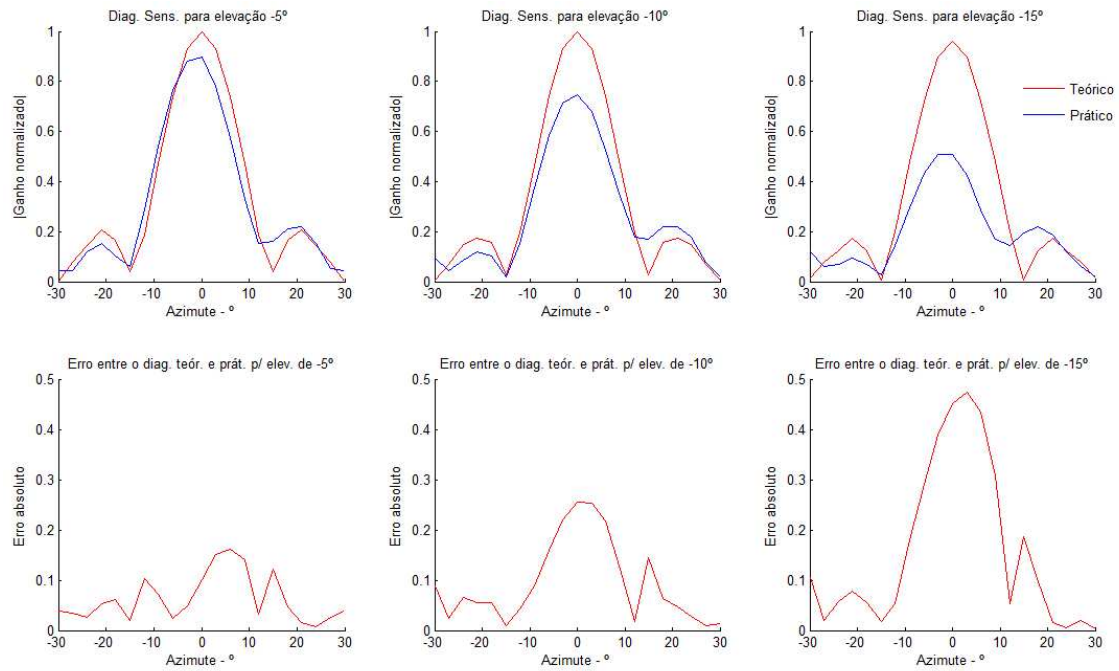


Figura 5.9: Gráficos com diagrama de sensibilidade para várias elevações e erro associado.

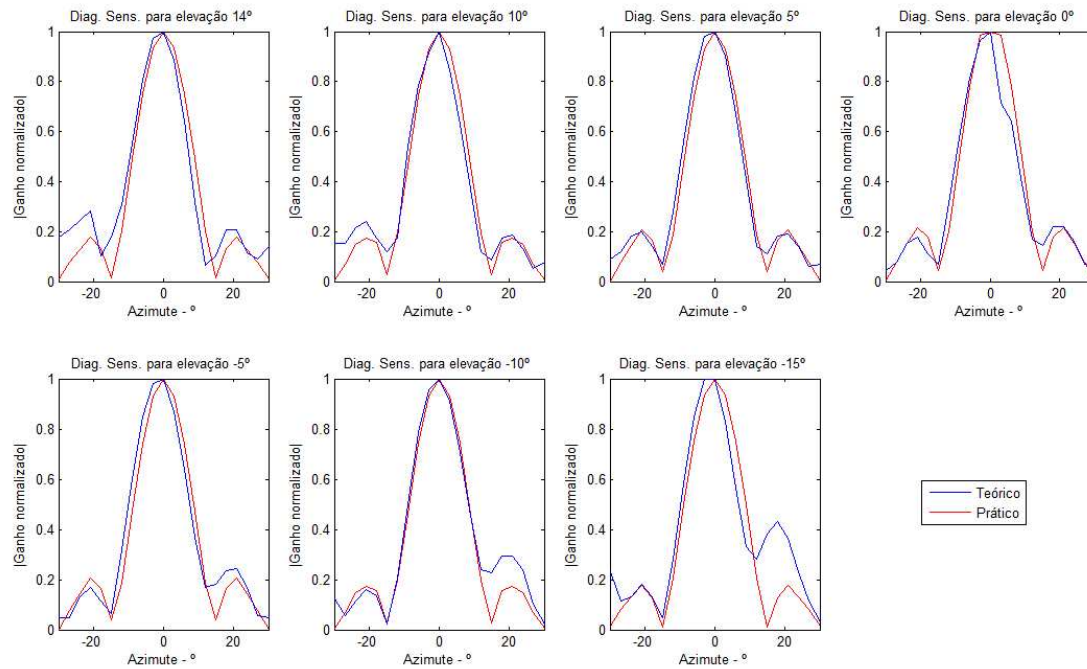


Figura 5.10: Gráficos com diagrama de sensibilidade normalizados para as várias elevações.

obstáculos foram colocados em cima de suportes metálicos, que foram minimamente isolados acusticamente para evitar reflexões nestes. Os obstáculos utilizados foram tijolos sólidos de barro e o sistema implementado completo, assim como o cenário montado, podem ser observados na Figura 5.11 a). Os tijolos utilizados têm cerca de 6cm de largura e 18cm de altura e foi tentado coloca-los sempre com a face destas dimensões direccionada para o centro do array.

Posteriormente foram efectuados testes do mesmo género dos anteriores, mas desta vez com o array junto ao solo, mais concretamente a uma altura de 7.7cm , como se pode ver na Figura 5.11 b). Os testes a esta altura ajudam na simulação de uma possível montagem num robot de pequenas dimensões.

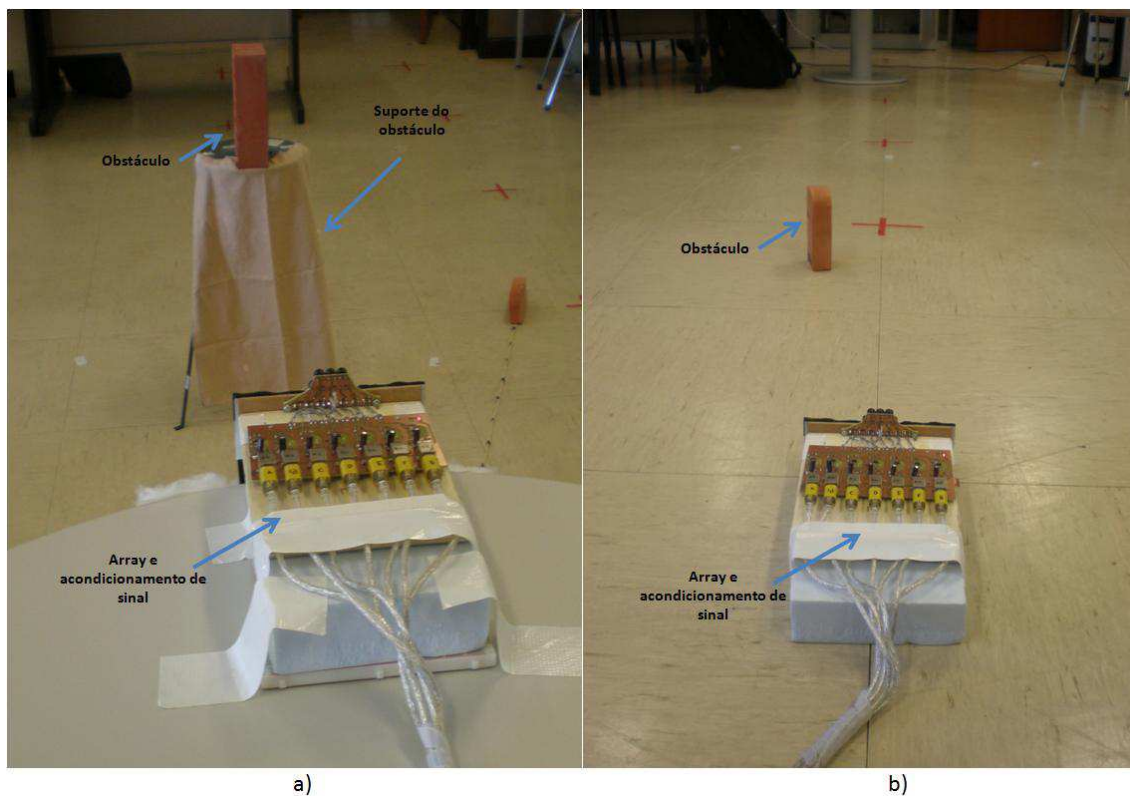


Figura 5.11: a) esquema dos ensaios feitos no “ar”; b) esquema dos ensaios feitos rente ao solo.

Foram efectuados 10 ensaios para diferentes ângulos do obstáculo e diferentes distâncias ao array, sendo dois dos ensaios efectuados com 2 obstáculos a diferentes distâncias. A seguinte Tabela 5.1 contém os ângulos e distâncias a que os obstáculos foram colocados.

Os resultados obtidos permitem um grau muito bom de satisfação, pois os erros máximos obtidos são de 3° para o ar e 1° para o solo. Ao contrário do esperado, os melhores resultados obtidos são para os ensaios junto ao solo. Uma das possíveis explicações para o caso, será o facto de o array quando assente na mesa (no ar) faça com que a mesa vibre devido à emissão do sinal e provoque uma interferência física aquando da recepção. Para os ensaios junto ao solo, o array está assente no chão do laboratório, logo oferece uma maior resistência física à vibração provocada pelos ultra-sons emitidos. De referir ainda, que só está apresentado o resultado de

Ensaio	Ângulos (°)	Distâncias (cm)
1	-30	110
2	-20	80
3	-10	70
4	0	150
5	10	100
6	20	90
7	30	120
8	Sem obstáculos	-
9	-20	80
	10	100
10	0	150
	20	90

Tabela 5.1: Tabela com a disposição dos obstáculos para os vários ensaios, nos ensaios 9 e 10 há dois obstáculos.

uma medição para cada cenário. Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram efectuados vários conjuntos de ensaios, tanto no ar como junto ao solo, mas os resultados apresentados são somente referentes a um conjunto de ensaios no ar e outro junto ao solo.

Quanto às distâncias a que se encontram os obstáculos, obtidas na prática, possuem uma média de erro de 6.99 cm e devido padrão de 0,5911 para um universo de 60 amostras. Muito provavelmente, este facto deve-se à não consideração na prática do atraso introduzido pelo transdutor, que anda na ordem do 10 cm de alcance. No entanto, como a diferença é relativamente constante pode facilmente ser compensada, subtraindo os 6.99cm às medidas, obtendo assim resultados com uma média de erro de valor 0.

Os resultados obtidos na prática podem facilmente ser comparados com os teóricos, através da visualização da Tabela 5.2 e da Tabela 5.3, referentes aos ensaios do ar e solo respectivamente ou visualizando os gráficos das Figuras 5.12 à 5.41. Os gráficos são de coordenadas polares normalizadas, portanto os valores apresentados nos eixos não representam valores reais da distância. Para a correcta interpretação, tem que se fazer a comparação do máximo de alcance com um valor de 2 metros, para a direcção em frente [24]. De referir ainda que os gráficos apresentam-se para cada ensaio, seguindo a ordem de primeiro o gráfico teórico do ensaio, de seguida, o obtido no ensaio feito no ar e por último o executado no solo.

Um dos parâmetros das Tabela 5.2 e 5.3 é a soma do módulo das envolventes do sinal, que não é mais que a soma dos valores que cada sinal tem, atrasado de um determinado beam forming. É o módulo da envolvente, visto que aquando da amostragem de segunda ordem, o sinal fica automaticamente com a parte real e imaginária do mesmo. Portanto para análise dos resultados, os ângulos práticos com maior módulo da envolvente deveriam corresponder aos ângulos reais. Na tabela em questão, foram considerados somente os picos, com um módulo da envolvente maior que o valor 50.

Este valor da soma do módulo das envolventes dos sinais foi obtido através dos resultados provenientes dos ensaios sem obstáculos para o “ar” e junto ao solo. Para ensaios sem obstáculos seria de esperar que não chegassem ecos ao array, mas como existe ruído com valores da soma do módulo das envolventes dos sinais até sensivelmente 30, foi decidido usar

os 50 como valor de limite mínimo para evitar valores afectos de ruído.

Nos resultados apresentados na Tabela 5.2, somente está presente um valor de pico detectado para cada obstáculo. No entanto, na Tabela 5.3 é possível verificar nos ensaios 2 e 6 a presença de um pico de valor inferior. Estes picos são lóbulos secundários derivados dos picos de valor superior. Foi no entanto constatado, através deste e de resultados mais à frente apresentados, que os valores dos picos secundários eram inferiores a 85% do valor do pico máximo. Usaremos portanto os 85% como limite para atribuição de um pico como obstáculo detectado ou pico secundário. Esta comparação no entanto, só pode ser efectuada para picos que se encontrem à mesma distância em relação ao array.

Ensaio	Ângulos Reais (°)	Distâncias Reais (cm)	Ângulos Obtidos (°)	Distâncias Obtidas (cm)	Soma do módulo das envolventes dos sinais
1	-30	110	-27	116,15	413,10
2	-20	80	-18	86,92	965,30
3	-10	70	-8	76,62	1243,00
4	0	150	1	155,60	471,70
5	10	100	12	105,80	486,10
6	20	90	22	96,37	402,40
7	30	120	30	126,00	229,10
8	Sem obstáculos	-	-	-	-
9	-20	80	-17	86,92	662,00
	10	100	9	106,70	712,10
10	0	150	0	156,00	33,20
	20	90	23	96,80	413,10

Tabela 5.2: Tabela com os valores teóricos e os valores obtidos nos ensaios realizados no “ar”, a uma altura de 83,2cm.

Ensaio	Ângulos Reais (°)	Distâncias Reais (cm)	Ângulos Obtidos (°)	Distâncias Obtidas (cm)	Soma do módulo das envolventes dos sinais
1	-30	110	-30	117,00	424,90
2	-20	80	-19 30	86,92 86,49	413,30 263,10
3	-10	70	-11	77,48	230,30
4	0	150	0	155,60	129,30
5	10	100	9	106,70	760,10
6	20	90	-30 19	96,80 96,80	208,00 398,60
7	30	120	29	126,00	278,50
8	Sem obstáculos	-	-	-	-
9	-20	80	-19 30	86,92 86,49	435,70 264,90
	10	100	10	106,70	793,70
10	0	150	0	155,60	133,60
	20	90	-30 19	96,80 96,80	208,90 360,40

Tabela 5.3: Tabela com os valores teóricos e os valores obtidos nos ensaios feitos ao nível do solo, a uma altura de $7.7cm$.

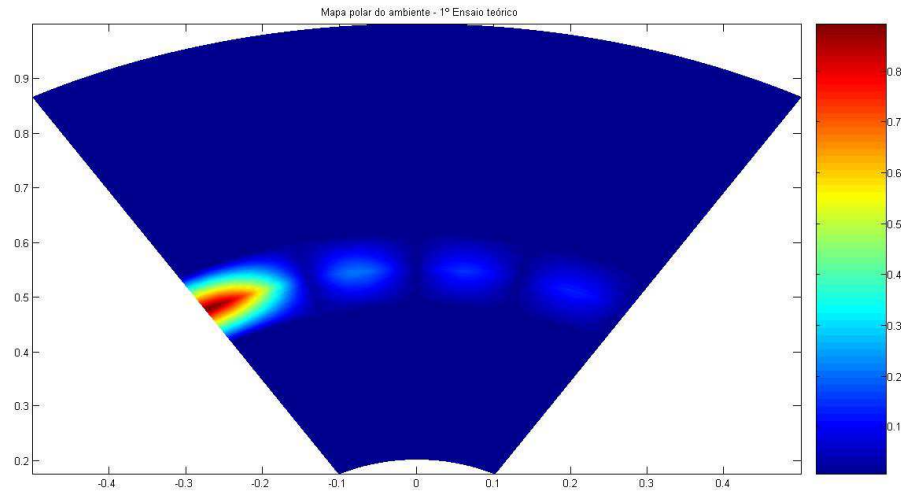


Figura 5.12: Mapa polar da resposta do array - 1º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a -30° e a 1,1m.

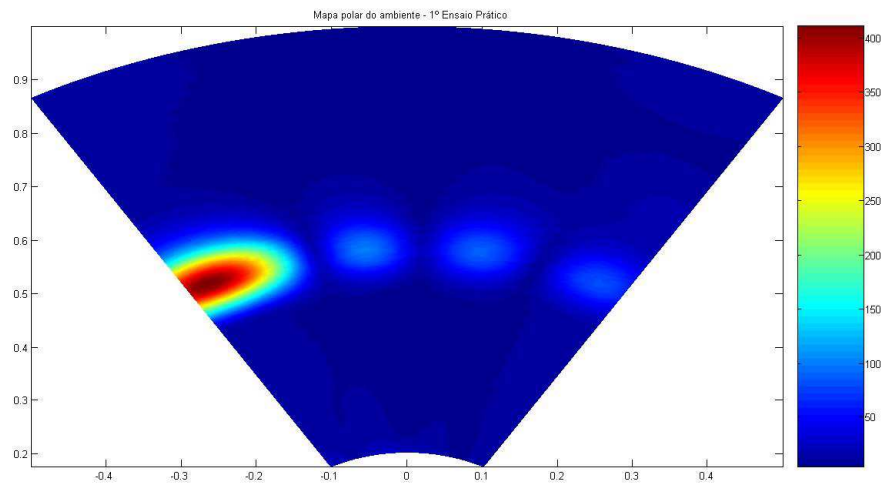


Figura 5.13: Mapa polar da resposta do array - 1º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a -30° e a 1,1m.

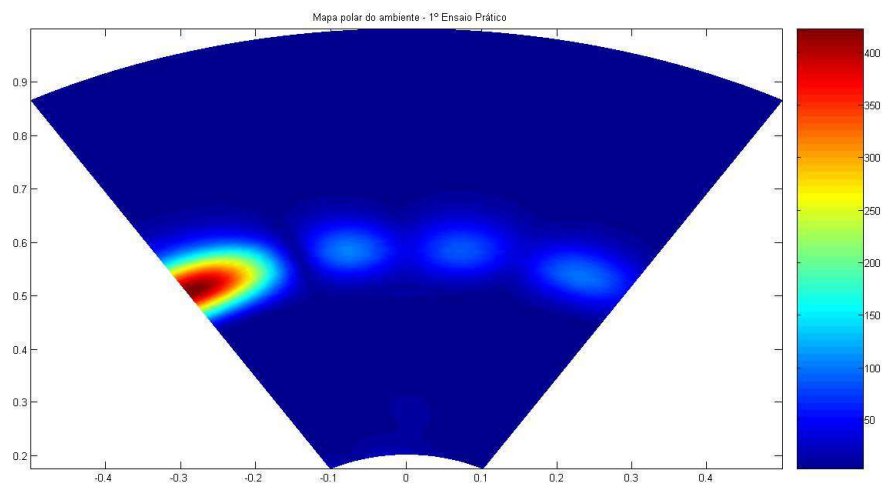


Figura 5.14: Mapa polar da resposta do array - 1º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a -30° e a 1,1m.

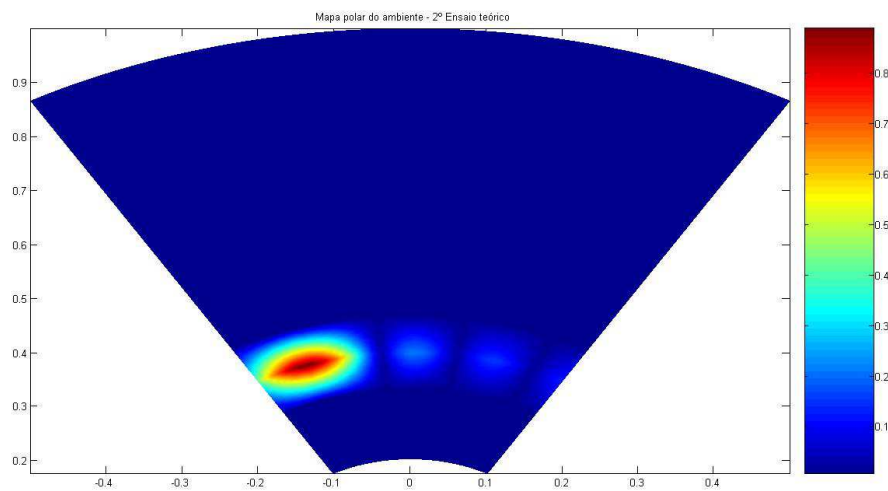


Figura 5.15: Mapa polar da resposta do array - 2º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a -20° e a 0,8m.

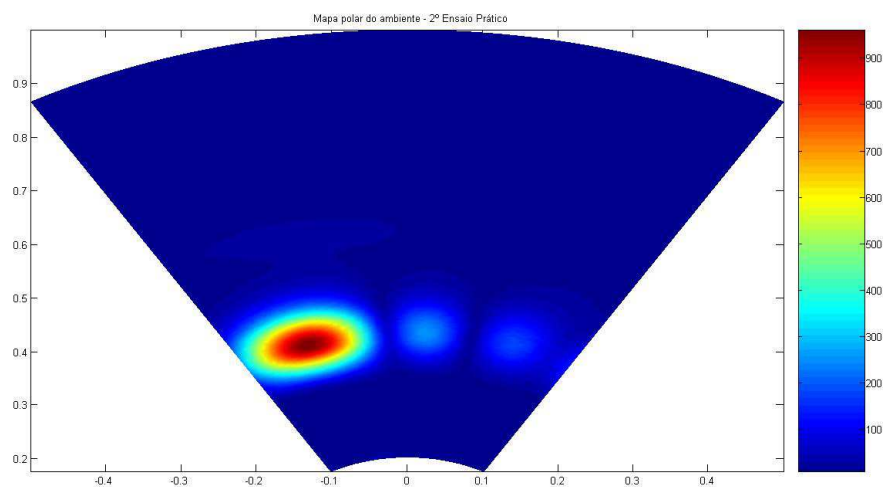


Figura 5.16: Mapa polar da resposta do array - 2º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a -20° e a 0,8m.

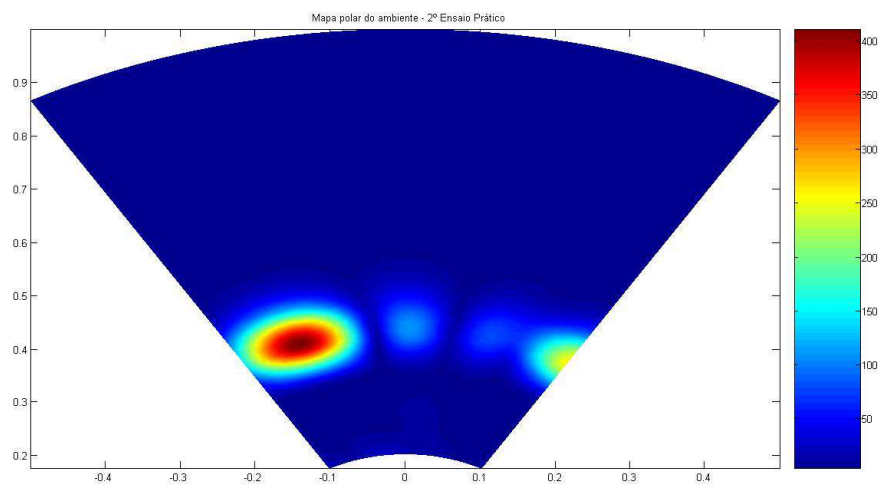


Figura 5.17: Mapa polar da resposta do array - 2º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a -20° e a 0,8m.

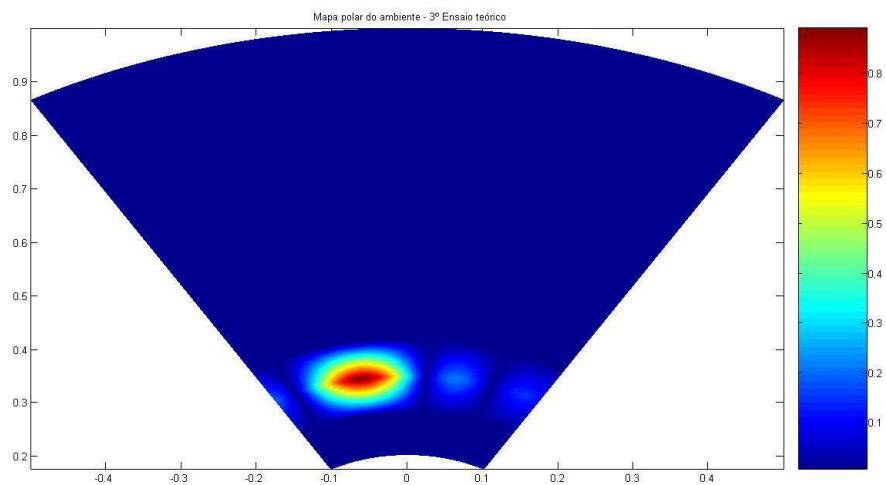


Figura 5.18: Mapa polar da resposta do array - 3º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a -10° e a 0,7m.

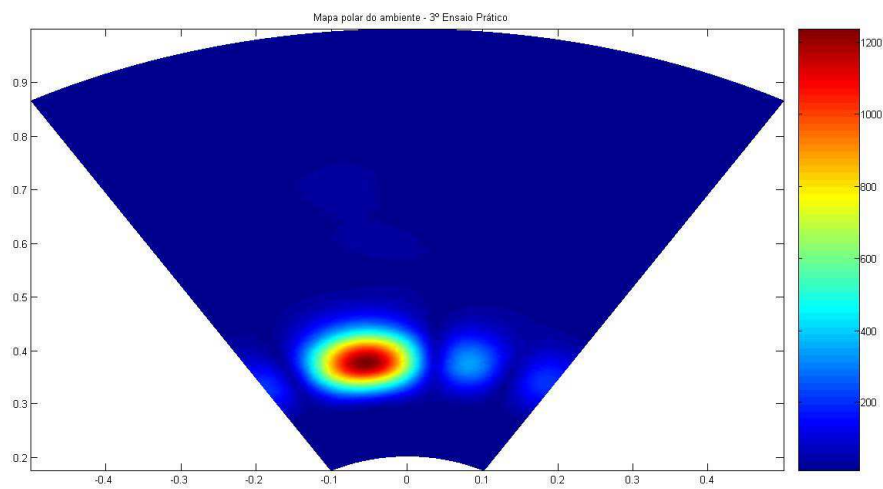


Figura 5.19: Mapa polar da resposta do array - 3º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a -10° e a 0,7m.

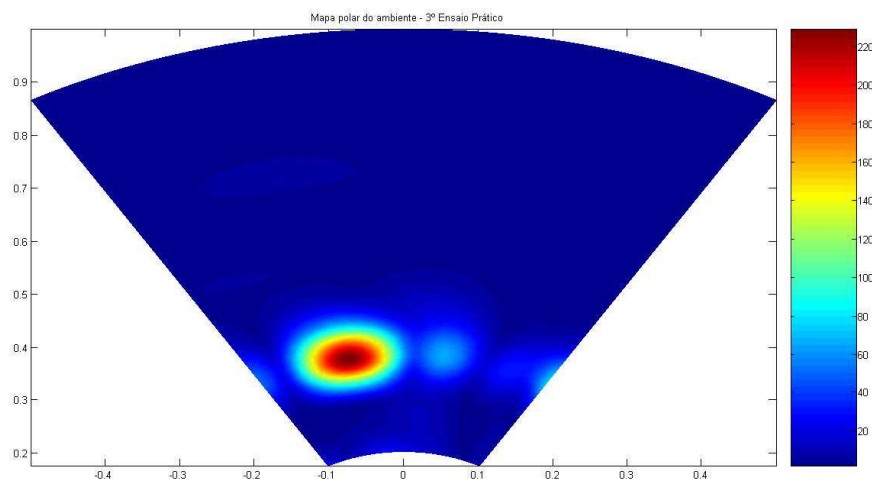


Figura 5.20: Mapa polar da resposta do array - 3º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a -10° e a 0,7m.

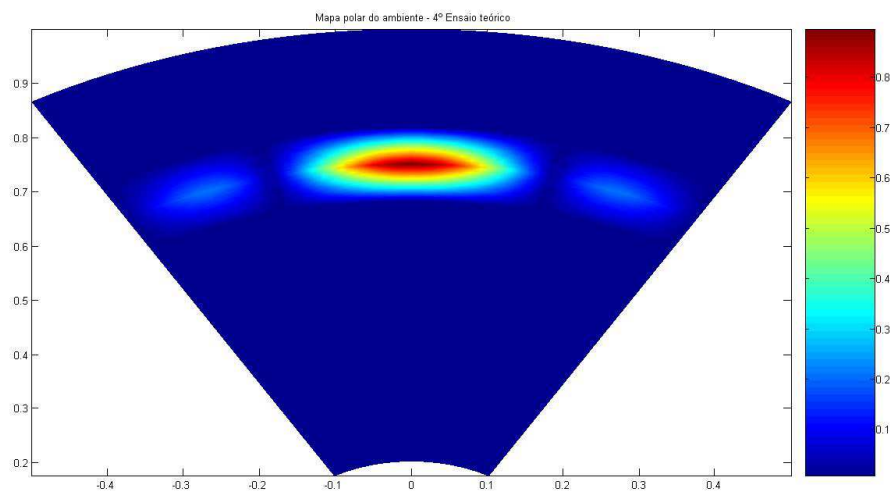


Figura 5.21: Mapa polar da resposta do array - 4º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 0° e a 1,5m.

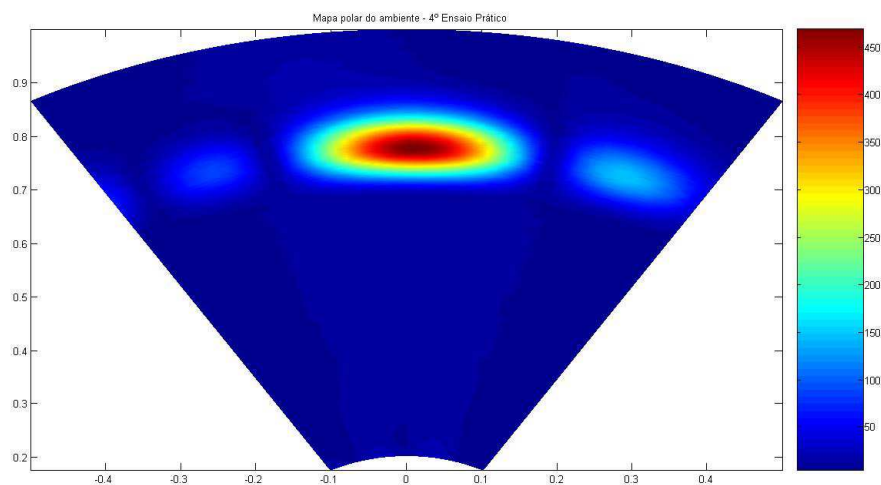


Figura 5.22: Mapa polar da resposta do array - 4º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 0° e a 1,5m.

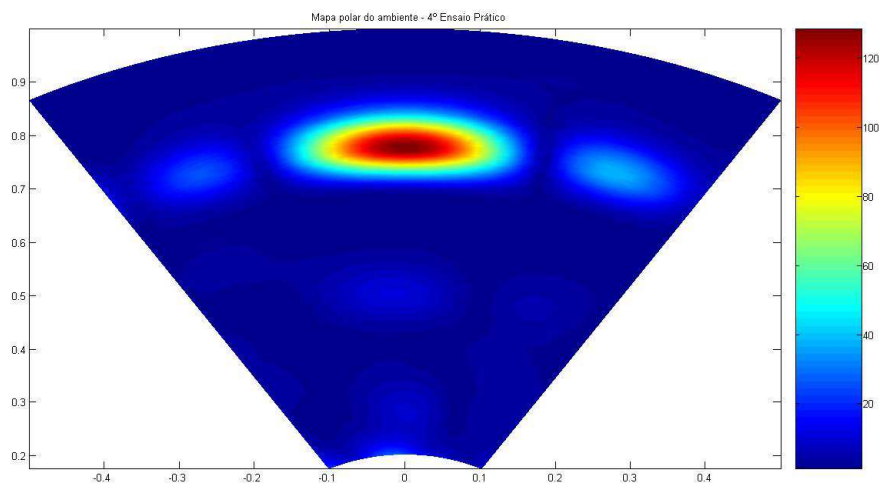


Figura 5.23: Mapa polar da resposta do array - 4º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 0° e a 1,5m.

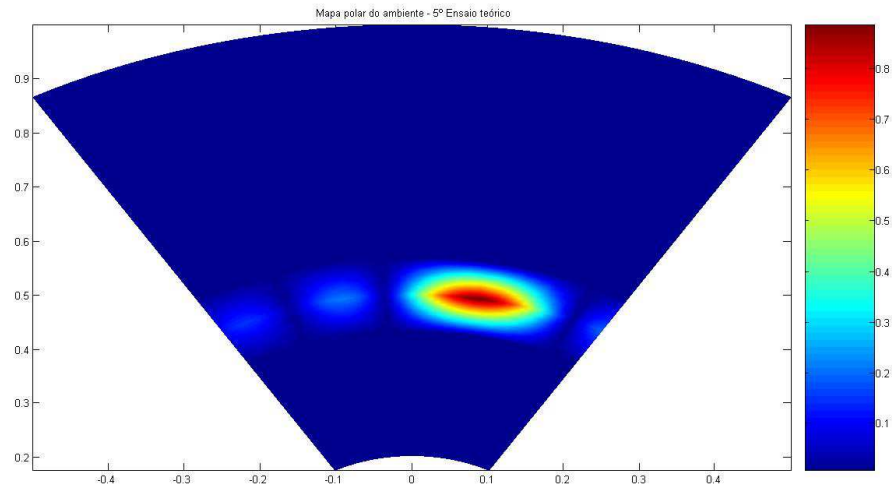


Figura 5.24: Mapa polar da resposta do array - 5º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 10° e a 1,0m.

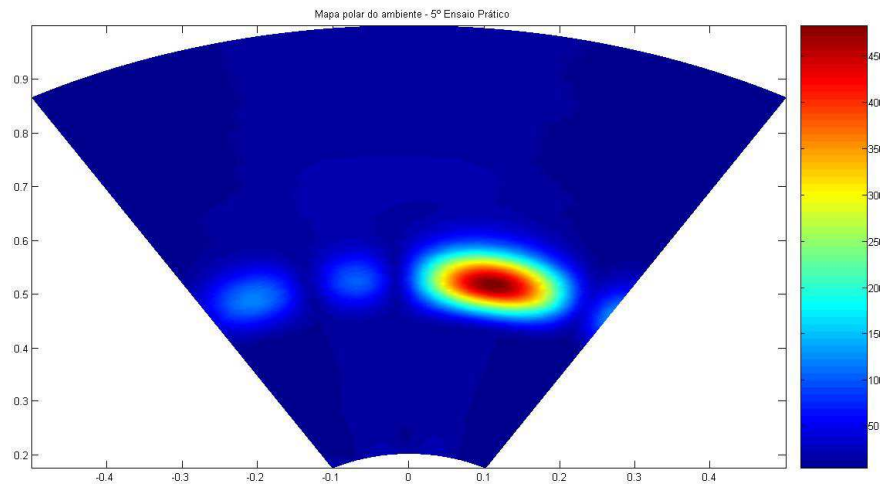


Figura 5.25: Mapa polar da resposta do array - 5º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 10° e a 1,0m.

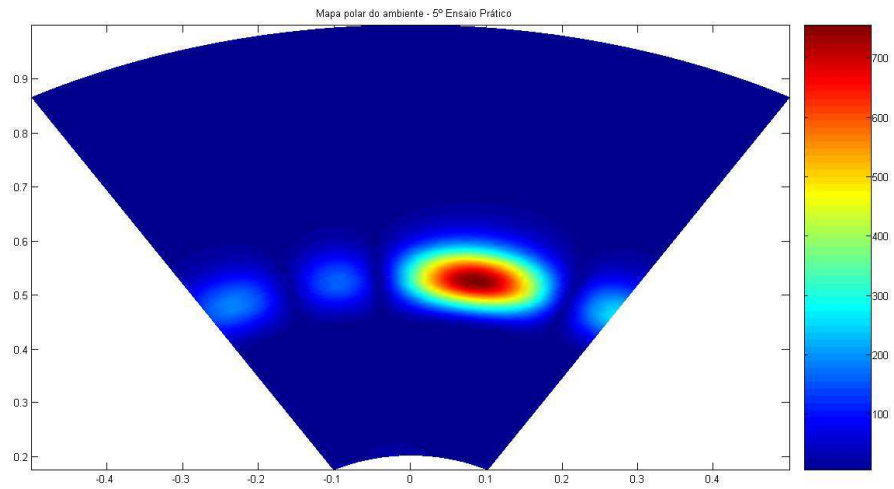


Figura 5.26: Mapa polar da resposta do array - 5º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 10° e a 1,0m.

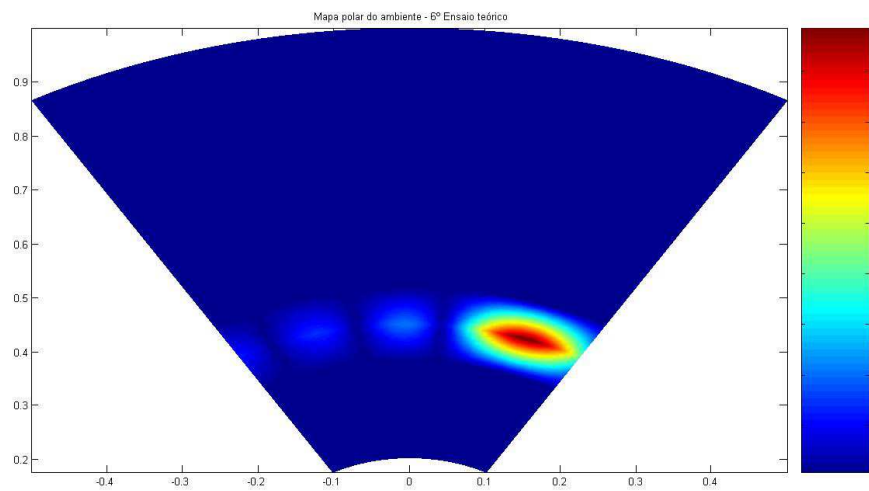


Figura 5.27: Mapa polar da resposta do array - 6º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 20° e a 0,9m.

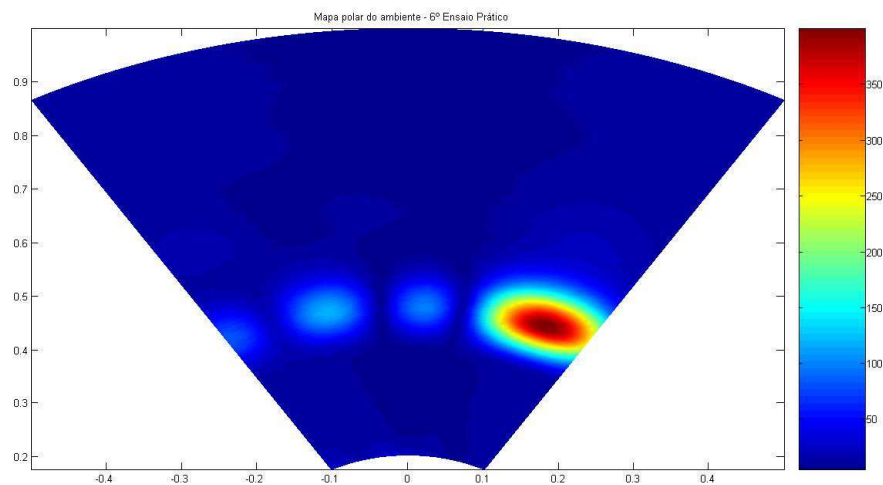


Figura 5.28: Mapa polar da resposta do array - 6º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 20° e a 0,9m.

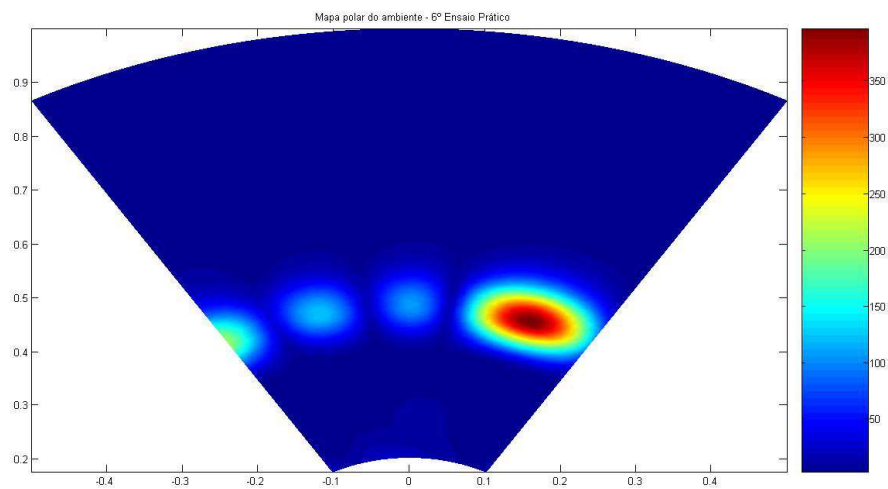


Figura 5.29: Mapa polar da resposta do array - 6º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 20° e a 0,9m.

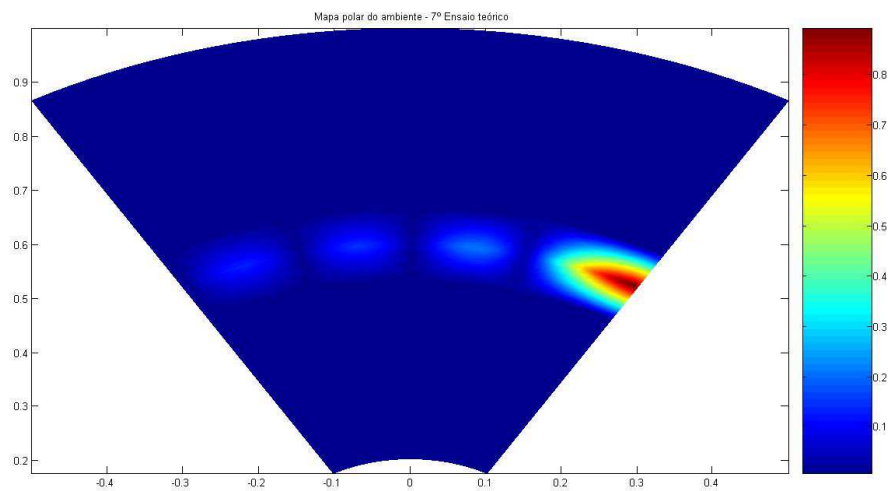


Figura 5.30: Mapa polar da resposta do array - 7º Ensaio obtido por simulação. Obstáculo a 30° e a 1,2m.

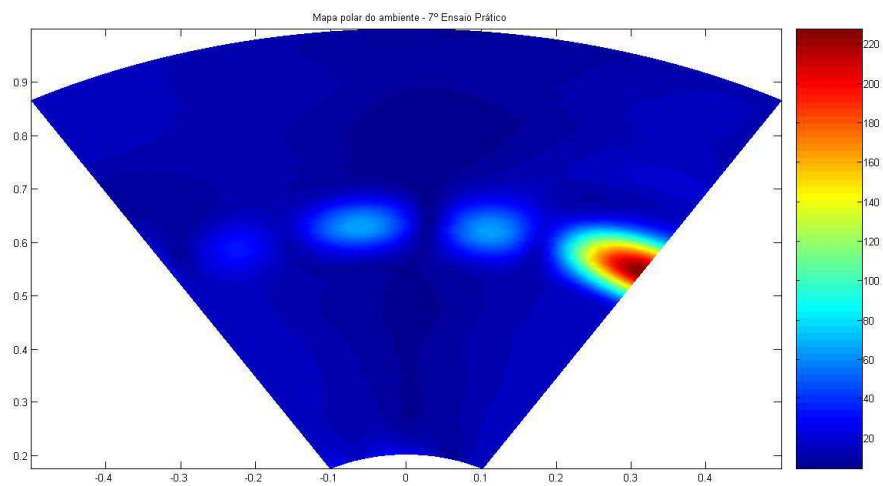


Figura 5.31: Mapa polar da resposta do array - 7º Ensaio Prático no ar. Obstáculo a 30° e a 1,2m.

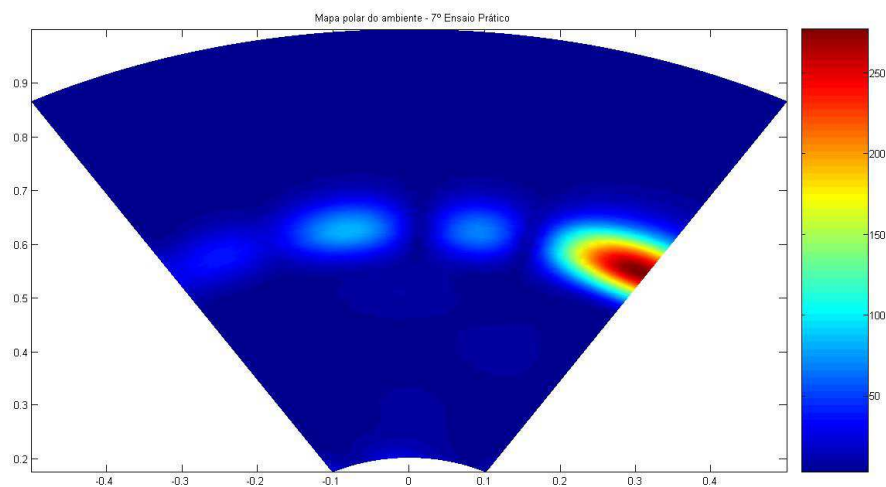


Figura 5.32: Mapa polar da resposta do array - 7º Ensaio Prático no solo. Obstáculo a 30° e a 1,2m.

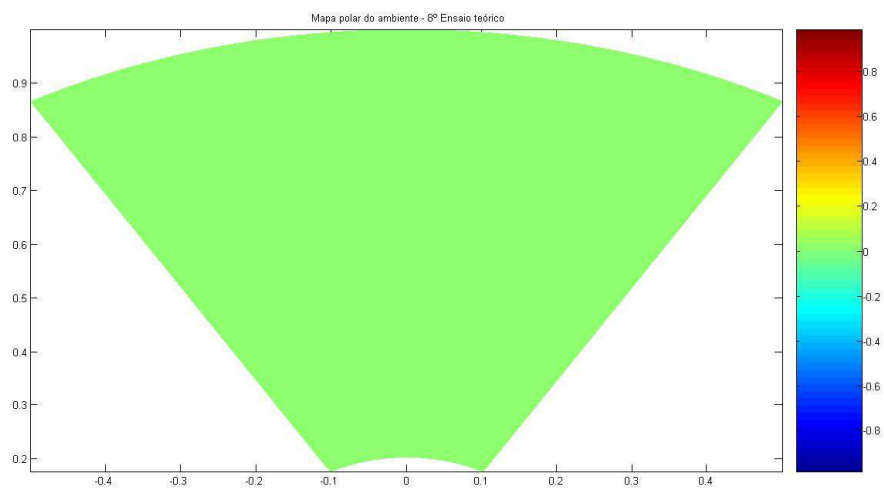


Figura 5.33: Mapa polar da resposta do array - 8º Ensaio obtido por simulação. Sem obstáculo.

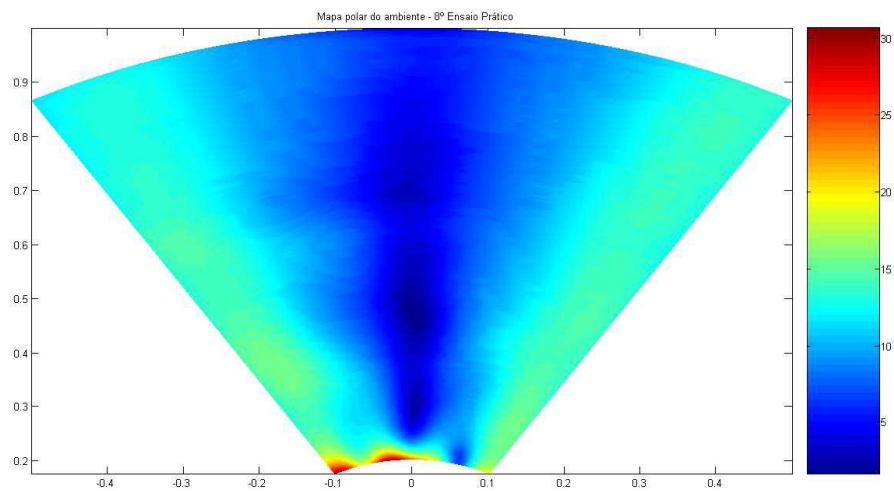


Figura 5.34: Mapa polar da resposta do array - 8º Ensaio Prático no ar. Sem obstáculo.

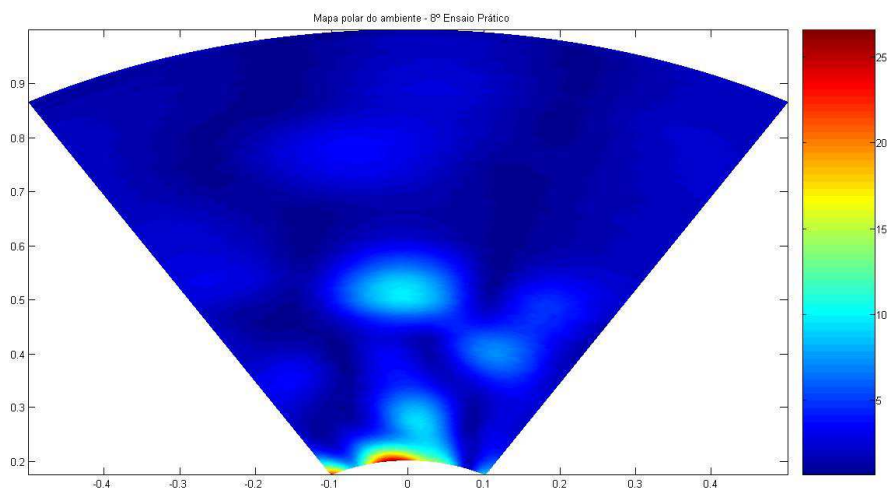


Figura 5.35: Mapa polar da resposta do array - 8º Ensaio Prático no solo. Sem obstáculo.

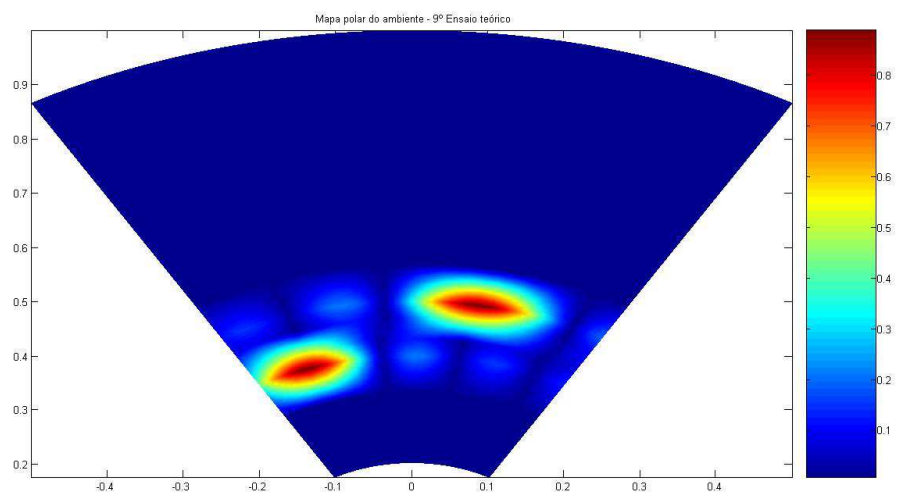


Figura 5.36: Mapa polar da resposta do array - 9º Ensaio obtido por simulação. Obstáculos a -20° e 0,8m e a 10° e 1,0m.

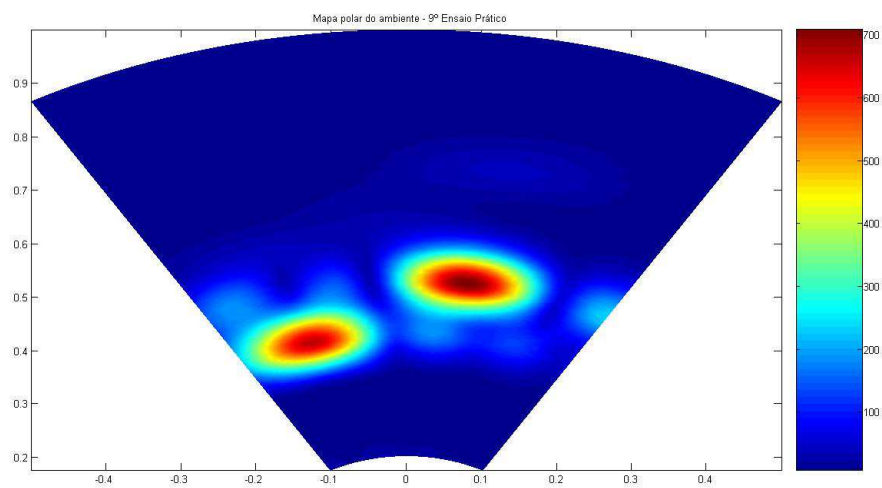


Figura 5.37: Mapa polar da resposta do array - 9º Ensaio Prático no ar. Obstáculos a -20° e 0,8m e a 10° e 1,0m.

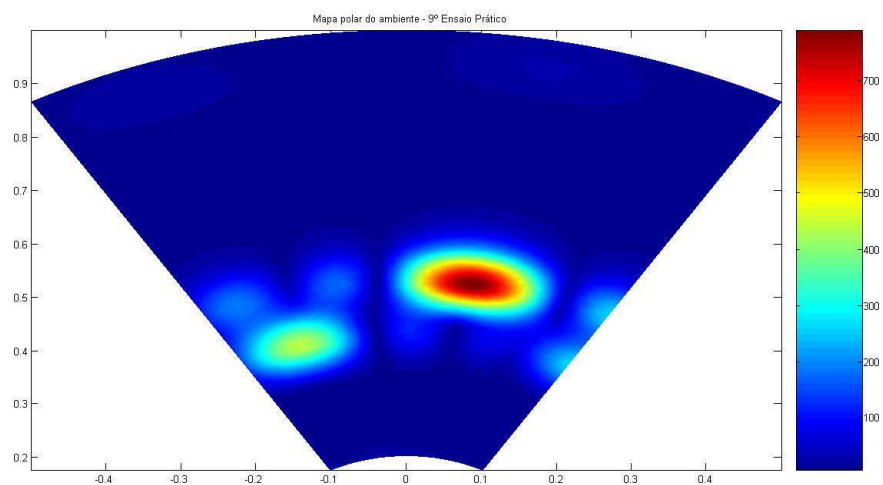


Figura 5.38: Mapa polar da resposta do array - 9º Ensaio Prático no solo. Obstáculos a -20° e 0,8m e a 10° e 1,0m.

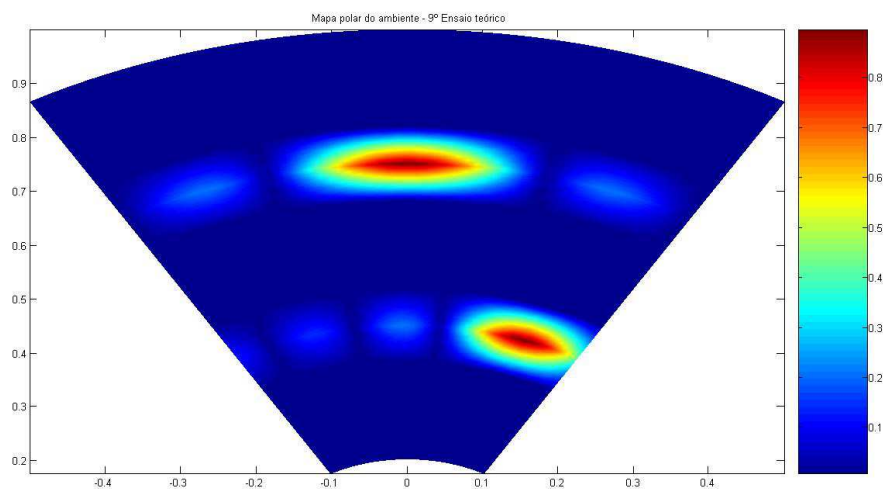


Figura 5.39: Mapa polar da resposta do array - 10º Ensaio obtido por simulação. Obstáculos a 0° e 1,5m e a 20° e 0,9m.

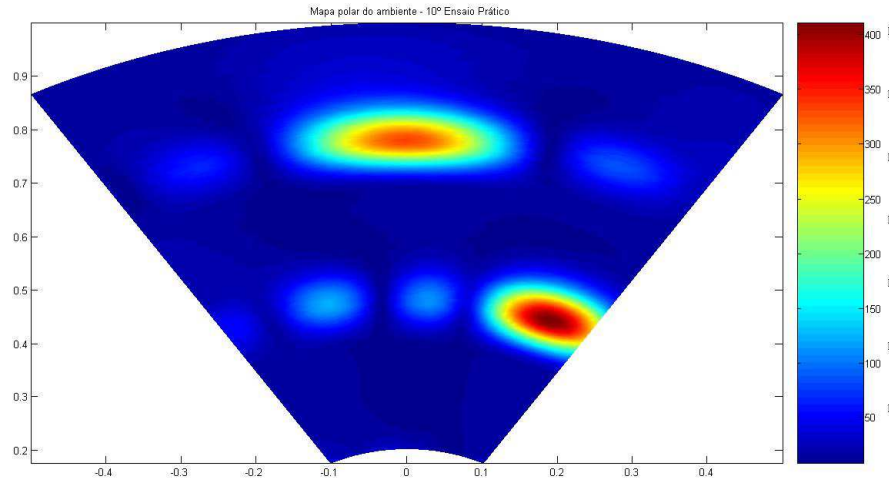


Figura 5.40: Mapa polar da resposta do array - 10º Ensaio Prático no ar. Obstáculos a 0º e 1,5m e a 20º e 0,9m.

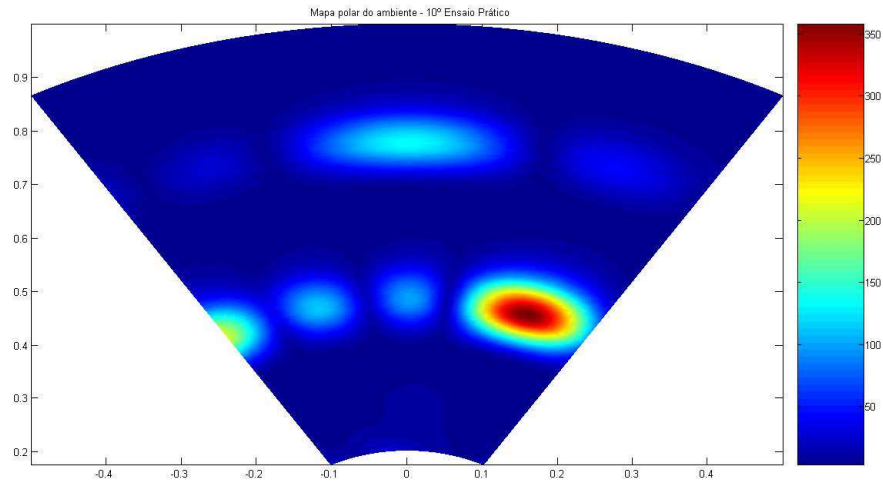


Figura 5.41: Mapa polar da resposta do array - 10º Ensaio Prático no solo. Obstáculos a 0º e 1,5m e a 20º e 0,9m.

5.5 Obstáculos fora do intervalo de Beam forming

Com o intuito de verificar a influência de obstáculos localizados fora da gama de 60° (-30° a 30°) de Beam Forming foi executado um estudo que além de servir para este ponto será útil para estudar o possível aumento da gama em análise. O fundamento para o mesmo, deriva do facto de existir a real possibilidade de um obstáculo se encontrar fora do intervalo de Beam Forming e os seus lóbulos secundários influenciarem o sistema. Supõe-se portanto que, no intervalo em questão não se encontra nenhum obstáculo, logo os sinais retornados seriam 0. No entanto se, por exemplo, um obstáculo estiver a -40° pode acontecer que a 20° apareça um

pico secundário com uma amplitude considerável e que seja considerado como obstáculo nesse ângulo. Este fenómeno é chamado de *aliasing* espacial e pode ser parcialmente observado no caso do 2º ensaio feito no chão e que está presente no gráfico da Figura 5.42, em que se surge um segundo pico com alguma relevância a 30°.

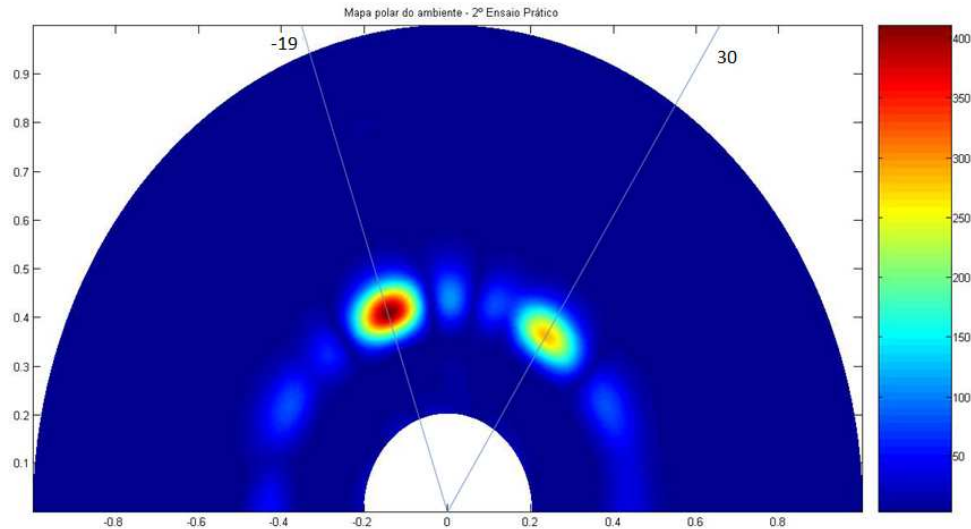


Figura 5.42: Mapa polar do ambiente - 10º Ensaio Prático no solo para Beam Forming de -90° a 90°. Obstáculo a -20° e 0,8m.

Os ensaios consistiram na variação do ângulo entre o array e o obstáculo, de -90° a 90°, com intervalos de 10°, para uma distância de 1 metro. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.4 e consistem na obtenção dos ângulos e valores da soma do módulo das envolventes dos sinais (SMES), para os picos que sejam superiores a 85% da maior amplitude e com valor SMES superior a 50.

Pela análise da tabela atrás mencionada, podemos verificar que somente os obstáculos dentro da gama de 60° de Beam Forming e os imediatamente depois, ou seja, -40° e 40° é que possuem um valor dentro da janela de análise maior que 50. Todos os outros nada influenciam na gama de 60° de análise.

Depois de constatado os bons resultados obtidos até este ponto, foi pensado na possibilidade de aumentar o intervalo de Beam Forming. À partida tal não foi equacionado devido ao facto de para além da abertura do transdutor ser de cerca de 60°, o array implementado faria com que aparecessem máximos secundários para beam maiores que 60° a partir do ângulo a que o obstáculo se encontra. Pela análise dos resultados práticos o fenómeno não foi verificado, pois os picos secundários dos obstáculos em análise, que se encontram dentro do intervalo -40° a 40°, não possuem valor superior ao threshold de 85% do valor do pico máximo, usado até aqui como limite. Ou seja, obstáculos colocados dentro da gama -40° a 40°, não produzem picos secundários dentro da mesma gama, maiores que os 85% do valor máximo do maior pico. Acrescentando ainda o facto de que todos os obstáculos colocados dentro desse intervalo foram correctamente detectados com um erro máximo de 4° e obstáculos colocados fora da gama não provocam picos secundários dentro da gama em análise.

Concluindo este ponto, o Beam Forming do sistema poderá ser então efectuado de -40° a 40°, para detecção de obstáculos singulares na distância, ou seja com um obstáculo somente

Ensaio	Ângulos Reais (°)	Ângulos Obtidos (°)	Soma do módulo das envolventes dos sinais
1	-90	-	-
2	-80	-	-
3	-70	-	-
4	-60	-57 63	67,19 67,22
5	-50	-49 80	165,00 165,10
6	-40	-39	286,00
7	-30	-29	449,10
8	-20	-19	702,10
9	-10	-10	857,00
10	0	0	446,70
11	10	9	403,50
12	20	19	389,10
13	30	28	424,00
14	40	36	246,00
15	50	-90 46	152,40 153,30
16	60	-67 55	68,76 68,72
17	700	-	-
18	90	-	-
19	90	-	-

Tabela 5.4: Tabela com os valores da variação angular de um obstáculo para uma distância fixa de 1 metro.

por cada distância ao array.

5.6 Vários obstáculos à mesma distância e ângulos diferentes

Um dos principais problemas que poderá surgir no uso deste sistema é quando existirem dois objectos à mesma distância do array, mas com ângulos diferentes. Este caso particular pode fazer com que o pico máximo, que corresponderia a um dos obstáculos que se encontra em ângulos mais distantes de 0° , seja de valor comparável ao dos picos secundários de outro obstáculo. Isto é, a cada obstáculo corresponde um pico principal e vários picos secundários, quando um obstáculo está num ângulo mais afastado de 0° , o valor do seu pico máximo pode ser semelhante a um dos picos secundários de outro obstáculo. Isto pode fazer com que o obstáculo em ângulos mais distantes de 0° possa não ser detectado. Esta diferença de valor existente para o pico máximo de obstáculos mais distantes de 0° é explicada pelo facto do ganho do transdutor ter valores inferiores para esses ângulos. Outra explicação ainda é o facto de a intensidade da onda que embate no obstáculo, enviada pelo array, não ser tão elevada em relação a um obstáculo que se encontre mais frontal com o array.

Para estudar a possibilidade de não detecção desses obstáculos, foram usados dois obstáculos, colocados à mesma distância do array, um posicionado a 0° e outro de -60° a 60° , com intervalos de 10° exceptuando os 0° . A escolha destes valores deve-se ao facto de através da análise da Tabela 5.4, ter-se verificado que somente nesta gama os valores obtidos serem superiores ao valor do ruído (50). O posicionamento do obstáculo fixo a 0° deve-se ao facto de este ser dos ângulos que possui um retorno de sinal com maior intensidade, portanto nada melhor que comparar este pico com os de obstáculos posicionados em ângulos diferentes. Os resultados obtidos nestes ensaios podem ser observados na Tabela 5.5, onde são apresentados os valores dos dois maiores picos detectados.

Os resultados presentes na Tabela 5.5 reflectem os piores resultados obtidos até agora neste projecto, pois o pico máximo tem para grande número de ensaios, um valor muito superior ao segundo pico. Por exemplo, no décimo ensaio a diferença entre os dois picos principais referentes aos dois obstáculos, é de 59% do maior valor dos dois. Ou seja, neste caso o valor do pico mínimo (227,20), referente ao obstáculo do ângulo 40° , é 59% inferior ao valor do pico referente ao obstáculo situado a 0° (554,20). Consideram-se estes valores como menos bons, pois somente para 3 ensaios a diferença do pico máximo para o seguinte é menor que 15%, limite assumido na secção 5.4, para a detecção dos dois picos dos obstáculos.

O resultado destes ensaios é que caso exista mais que um obstáculo à mesma distância do array e que um esteja perto de 0° e o outro afastado, poderá não ser detectado aquele que se encontra em ângulos mais distantes de 0° . No entanto, na aplicação prática deste sistema num robot, o problema diminuiria. Esta diminuição deve-se ao facto de que quando o robot se desviasse do único obstáculo detectado, ele rapidamente teria percepção do segundo, visto os obstáculos ficarem as distâncias diferentes do array.

5.7 Uso de interpolação

Foi pensado igualmente a possibilidade de fazer somente Beam Forming, para determinados ângulos, e posteriormente efectuar-se-ia uma interpolação 2D, recorrendo por exemplo, à função `interp2` do *MATLAB*. Foi usada uma implementação em *MATLAB*, para testar o uso de interpolação na obtenção do resultado do Beam Forming. Foi executado Beam Forming

Ensaio	Ângulos Reais (°)	Ângulos Obtidos (°)	Soma do módulo das envolventes dos sinais	Diferença do pico máx. para o segundo (%)
1	0	0	641,80	69
	-60	21	197,20	
2	0	0	608,10	69
	-50	20	188,60	
3	0	0	694,00	49
	-40	-38	350,70	
4	0	0	697,40	42
	-30	-31	402,80	
5	0	0	756,70	2
	-20	-20	773,30	
6	0	5	583,30	11
	-10	-14	657,00	
7	0	-1	593,20	44
	10	15	331,30	
8	0	0	721,50	9
	20	20	654,90	
9	0	-1	662,50	38
	30	31	413,20	
10	0	0	554,20	59
	40	37	227,20	
11	0	0	598,90	72
	50	21	168,00	
12	0	0	601,30	69
	60	20	188,80	

Tabela 5.5: Tabela com os valores da variação angular de um obstáculo com outro fixo, para uma distância de 1 metro.

para alguns ângulos, e determinados os restantes com o uso de uma função de interpolação. O programa *MATLAB* demorou cerca de 0.22 segundos a calcular a interpolação, para beam forming de -30° a 30° . Este tempo elevado, obtido num processador de velocidade muito superior ao do DSP, veio comprometer um avanço do projecto neste sentido. Como resultado deste elevado tempo de processamento, e assumindo que mesmo optimizando o código em questão para o nosso sistema, este demoraria um tempo elevado a ser executado e usaria bastantes recursos do processador, foi abandonada esta modificação no funcionamento do software.

5.8 Resumo

Neste capítulo foram efectuados vários testes ao sistema e abordadas algumas situações em que poderiam ser gerados resultados que não reflectissem todos os obstáculos presentes nos ensaios.

A colocação dos condensadores que faltavam num dos pinos da DAC (TLV5630) presente na *Locus Board*, mostraram reduzir em grande percentagem o erro entre os valores de tensão obtidos à saída da DAC e as tensões correspondentes ao código digital enviado para a DAC.

Da obtenção do diagrama de sensibilidade do array na câmara anecóica resultaram valores, embora diferentes, mas que demonstram um comportamento semelhante aos obtidos teoricamente. No entanto, esta semelhança de comportamentos somente é verificada para elevações entre -15° e 14° .

Através da comparação dos resultados obtidos na câmara anecóica com os teóricos, para as elevações entre -15° e 14° . O valor 0,4731 foi o valor máximo obtido para o erro absoluto do módulo do ganho normalizado entre os valores teóricos e práticos, para a elevação de 15° .

Foram efectuados testes práticos em diversos cenários, com obstáculos em diferentes posições. Estes testes foram feitos tanto “no ar”, a cerca de 80cm, como rente ao solo, a cerca de 8cm. Através dos ensaios realizados sem qualquer obstáculo em frente do array, foi estipulado o valor de 50, como o limite mínimo de amplitude dos picos a detectar. Este valor é correspondente à soma do módulo das envolventes dos sinais.

Os erros máximos entre os ângulos dos picos máximos presentes no mapa digital gerado e o real ângulo do posicionamento dos obstáculos foram de 3° para os ensaios no ar e 1° para os ensaios no junto ao solo.

Foi igualmente estudada a influência que obstáculos que se encontrem fora da gama de beam forming provocam na detecção de obstáculos dentro dessa gama. Através da análise dos resultados obtidos, foi decidido o aumento da gama de beam forming, que até aqui era de -30° a 30° , para de -40° a 40° . Este aumento foi possível, visto que obstáculos que se encontrem fora dessa gama, não provocam picos secundários na gama de beam forming, que possam induzir em erro na detecção de obstáculos. Neste ponto do trabalho, foi ainda admitido como limite mínimo para a detecção de obstáculos, picos com valor maior que 85% do valor máximo. Esta comparação só poderá ser feita para valores de picos que se encontrem à mesma distância do array.

Foi efectuado um estudo sobre a possibilidade da não detecção de obstáculos que se encontrassem à mesma distância do array e angularmente distantes de 0° , quando existem outro(s) perto desse ângulo. Verificou-se isso mesmo, pois em grande parte dos ensaios os picos máximos correspondentes aos obstáculos mais afastados angularmente, tinham valores inferiores a 85% dos valores dos picos máximos dos obstáculos perto de 0° .

Por último, foi descartada a hipótese do uso de interpolação para obtenção de resultados

de beam forming, quando fosse somente efectuado beam forming para alguns ângulos.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

6.1 Conclusões

Num âmbito geral o projecto proposto foi conseguido, pois o sistema implementado até este momento ficou a detectar na perfeição os obstáculos colocados nos ensaios, exceptuando um caso. Esta excepção acontece quando para uma mesma distância, existe um obstáculo em ângulos perto de 0° e outro relativamente afastado angularmente do primeiro, no entanto, basta o robot andar um pouco ou desviar-se minimamente para que desapareça a interferência, visto os obstáculos deixarem de estar à mesma distância. O limite usado para detecção dos obstáculos é de 85% do valor do pico máximo e ser maior que o valor (50) assumido como nível máximo do ruído. Portanto, picos com valores fora destes limites não devem ser considerados. A análise aos picos resultantes dos vários ângulos de beam forming só pode ser efectuada segundo a mesma distância. Ou seja, para a distância x analisa-se os vários ângulos de beam forming para possível detecção de picos correspondentes a obstáculos, o mesmo se fará para a distância y e z , etc. Nunca se efectuando a análise segundo um único ângulo de beam forming para as várias distâncias de alcance do sonar.

Pelos ensaios efectuados pode-se concluir que o valor do ruído devolvido por um ambiente sem obstáculos não é superior a um valor de 50 para a soma do módulo das envolventes dos sinais. Este valor é de resto acima dos resultados obtidos na prática, mas decidido como margem segura de erro.

Após os ensaios para objectos em toda a gama de 180° , foi possível ainda determinar a gama de Beam Forming de -40° a 40° . Desta maneira poderão ser detectados obstáculos dentro deste conjunto de ângulos e que estejam igualmente dentro do alcance do Sonar.

Foi concluído ainda a possibilidade da não detecção de um de dois obstáculos que se encontrem à mesma distância do array, com um situado perto do ângulo 0° e outro mais afastado. Este problema resulta da grande atenuação que o pico resultante do obstáculo mais afastado de 0° possa ter em relação ao que se encontre perto de 0° .

Foi abandonada ainda, a hipótese de utilização de interpolação para obtenção do resultado de beam forming. Este caso seria interessante se compensasse, em termos de tempo gasto, o cálculo do beam forming, somente para um número inferior de ângulos ao que fosse desejado.

Este projecto tem como principais vantagens em relação a sistemas com o mesmo objectivo funcional, os seguintes pontos:

- O array construído possui uma maior precisão angular para uma frente de 80° , que outro tipo de sistema para a mesma gama de ângulos;

- Maior número de análises ao meio por unidade de tempo, resultante de uma análise mais rápida ao ambiente;
- Elevada resolução, tanto angular como em termos de distância;
- Fácil flexibilidade, isto é, possibilidade de variar os parâmetros dos sistema em tempo real, tanto a frequência de análise ao meio, como a gama angular, ou ainda o alcance máximo do sonar;
- Boa relação qualidade/preço.

Como desvantagens em relação e sistemas com o mesmo objectivo funcional temos os seguintes pontos:

- Maior complexidade que os sistemas usualmente usados em robots, para o mesmo fim;
- Possui uma gama angular de análise inferior a 360° , gama esta que alguns possuem;

Conclui-se ainda que este projecto é uma mais-valia para o estado de arte nesta área e acima de tudo uma boa base de estudo e trabalho para posterior continuação de desenvolvimento do mesmo.

6.2 Características do sistema

Para o sistema implementado existem algumas limitações, nomeadamente físicas, práticas, de software entre outras. Algumas destas características limitativas são os seguintes exemplo:

- O tempo que o som leva a percorrer o alcance desejado, limita efectivamente o número de análises ao meio que o sistema consegue efectuar;
- A possibilidade de um obstáculo possuir as suas superfícies em ângulo, relativamente à normal do array, que não reflectam as ondas enviadas, faz com que se esses obstáculos se tornem não detectáveis;
- A impossibilidade de conseguir efectuar beam forming para ângulos inferiores a -40° ou superiores a 40° , devido ao aparecimento de aliasing espacial. Por outras palavras, começam a aparecer com notoriedade obstáculos, que resultam do facto de já estarmos a fazer beam forming para um ângulo em que o atraso resultante entre transdutores é superior a um período da portadora;
- Menor precisão no beam forming em comparação com arrays com mais de 7 elementos;
- O facto de não possuímos um array tipicamente 2D, ou seja, com bastantes elementos nas duas direcções, faz com que seja impraticável fazer beam forming para elevações;
- A impossibilidade de possuir num array dezenas de transdutores do tipo usado, visto o array possivelmente se tornar de dimensões impeditivas de montagem num pequeno robot;
- O funcionamento deste tipo de transdutores em torno de uma frequência fixa, impossibilita a coexistência de outros robots com o mesmo tipo de SONAR usando frequências iguais, ou mesmo a não existência de fontes de ultra-sons no alcance do mesmo, com a possibilidade de interferência com o sistema;

- Possui ainda uma restrição na possibilidade de não detecção de dois obstáculos em ângulos diferentes para uma mesma distância.

Possivelmente existem outros inconvenientes inerentes a este tipo de sistemas, mas de facto estes são os mais específicos desta implementação.

6.3 Trabalho Futuro

O trabalho futuro não será mais que uma continuação do trabalho já desenvolvido, com a possibilidade de alteração, implementação de novos métodos ou hardware. Como trabalho a realizar, o primeiro passo a dar, poderá ser o estudo do array junto a diversos tipos de solo. A compensação da variação da velocidade do som com a temperatura também poderá ser importante, e de fácil concretização com o módulo de temperatura existente na *locus board*. De seguida poder-se-á construir uma placa que contenha somente o necessário, dispensando deste modo o kit eZdsp, a *locus board* e todas as demais placas usadas, poupando assim em termos de espaço e de energia gasta. Relativamente a esta última preocupação, o software poderia ainda ser alterado de maneira a adormecer o DSP em tempos mortos. Aproveitando o facto de construção de hardware deverá ser estudada a viabilidade de acrescento de mais transdutores ao array. Por fim depois de ter o software e hardware a funcionar correctamente, poderia construir-se um meio de comunicação eficiente que possibilitasse a comunicação com um robot, no qual se montaria o sistema construído e se fariam testes no terreno. Depois dos testes efectuados, seria proveitoso a nível de economia de bateria a construção de software capaz de consoante a proximidade de obstáculos aumentar ou reduzir a frequência das análises ao meio.

Resumindo, os pontos principais que poderiam ser efectuados num trabalho futuro são:

- Testes do array junto a vários tipos de solo;
- Compensação da variação da velocidade do som no ar, com a temperatura ambiente;
- Agrupamento do hardware necessário numa só placa e com dimensões mínimas possíveis;
- Alteração de software de maneira a adormecer o DSP em tempos mortos;
- Estudo de viabilidade de aumento do número de elementos do array;
- Construção de um sistema de comunicação com um robot;
- Instalação e teste no terreno do sistema num robot;
- Alteração do software, para permitir mudança de frequência de análise do meio.

Bibliografia

- [1] Koudriavtsev, V.: O mundo do ultra-sons, Publicações Europa-América.
- [2] [http : //en.wikipedia.org/wiki/Sonar](http://en.wikipedia.org/wiki/Sonar) - 8 de Março de 2009.
- [3] Medina, Lúcia; Sánchez, Israel; Wykes Catherine: Acústica 2000: Airborne ultrasonic ranging system: a comparison between beam-forming techniques, Conference Paper, TecniAcustica 2000 - Madrid, 2000.
- [4] [http : //pt.wikipedia.org/wiki/Velocidade_do_som](http://pt.wikipedia.org/wiki/Velocidade_do_som) - 8 de Março de 2009.
- [5] Daniel Albuquerque: SLUS - Sistema de Localização com Ultra-Sons, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2007.
- [6] Figura, Zdenko and Kocis, Stefan: Ultrasonic Measurements and Technologies, Chapman and Hall - 1st Edition, 1996.
- [7] [http : //www.seattlerobotics.org/Encoder/nov99/Firstsonar.htm](http://www.seattlerobotics.org/Encoder/nov99/Firstsonar.htm) - 8 de Março de 2009.
- [8] [http : //www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id = 48&menu_id = 261](http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=48&menu_id=261) - 8 de Março de 2009.
- [9] [http : //www.hidrografico.pt/sonar – de – varimento – lateral.php](http://www.hidrografico.pt/sonar-de-varimento-lateral.php) - 8 de Março de 2009.
- [10] [http : //www.akin.ru/e_omm1.htm](http://www.akin.ru/e_omm1.htm) - 8 de Setembro de 2009.
- [11] [http : //www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/](http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/) - 8 de Setembro de 2009.
- [12] Zhang, Wei; Djughash, Joseph and Singh, Sanjiv: Parrots: A range Measuring Sensor Network, Technical report, Carnegie Mellon University, 2006.
- [13] [http : //cricket.csail.mit.edu/](http://cricket.csail.mit.edu/) - 8 de Setembro de 2009.
- [14] Moravec, Hans P. and Elfes, Alberto: High Resolution Maps form Wide Angle Sonar, IEEE, 1985.
- [15] Naidu, Prabhakar S.: Sensor Array Signal Processing, CRC Press, Florida, 2000.
- [16] Brookner, EliBrookner, Eli: Practical phased array antenna systems, Artech House Inc, 1991.

- [17] Couto, Eurico: DOMAC - Detecção de Obstáculos Móveis para Apoio à Condução, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2007.
- [18] [http : //www.farnell.com/datasheets/81173.pdf](http://www.farnell.com/datasheets/81173.pdf) - 8 de Setembro de 2009.
- [19] Sabatini, Angelo M., and Rocchi, Alessandro: Sampled Baseband Correlators for In-Air Ultrasonic Rangefinders, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 45 - Number 2, April 1998.
- [20] Ranganathan,Karthik; Santy, Mary K.; Blalock, Travis N.; Hossack, John A. and Walker, William F.: Sampled I/Q Beamforming for Compact and Very Low-Cost Ultrasound Imaging, IEEE Transactions on ultrasonic ferroelectrics and frequency control, Volume 51 - Number 9, 2004.
- [21] Bracewell, Ron: The Fourier Transform and its Applications, McGraw-Hill Inc, 1965.
- [22] Haykin, Simon: Communication Systems, 4Th Edition, John Wiley and Sons Inc, New York, 2001.
- [23] Powers, J. E.; Phillips, D. J.; Brandestini, M. A. and Sigelmann, R. A.: Ultrasound phased array delay lines based on quadrature sampling techniques, IEEE Trans. Sonics Ultrason, Volume 27 - Number 6, 1980.
- [24] [http : //pt.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_polares](http://pt.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_polares) - 8 de Setembro de 2009.

Outros artigos e livros consultados no decorrer do projecto:

- [25] Kuc, Roman and Kleeman, Lindsay: An optimal sonar array for target localization and classification, IEE Robotics and Automation, Volume 4 - Page 3130, 1994.
- [26] Ali, Murtaza; Magee, Dave and Dasgupta, Udayan: Signal Processing Overview of Ultrasound Systems for Medical Imaging, Technical report, Texas Instruments, 2008.
- [27] Badal, Sumit; Ravela, Srinivas; Draper, Bruce and Hanson, Allen: A practical obstacle detection and avoidance system, University of Massachusetts, 1994.
- [28] Baliga, Roshan Bantwal: Rapid Coordinate System and Mapping Using Cricket, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [29] Dijk, Esko Olavi: Indoor Ultrasonic Position Estimation Using a Single Base Station, Master Thesis, Eindhoven University, 2004.
- [30] Elfes, Alberto: Sonar-based real-world mapping and navigation, IEEE Journal of Robotics and Automation, Volume 3 - Number 3, 1987.
- [31] Fish, Peter: Diagnostic Medical Ultrasound, John Wiley and Sons, Ltd, 1990.

- [32] Fonseca, William D'Andrea; Gerges, Samir Nagi Yousri and Dougherty, Robert P.: Efeito de fluxo de ar de baixa velocidade em medições de beamforming, Conference Paper, VI Congresso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008, 2008.
- [33] Hazas, Mike and Hopper, Andy: Broadband Ultrasonic Location Systems for Improved Indoor Positioning, IEEE Transactions on mobile computing, Volume 5 - Number 5, 2006.
- [34] Heale, Andrew and Kleeman, Lindsay: A Real Time DSP Sonar Echo Processor, IEEE Intelligent Robots and Systems, Volume 2 - Page 1261, 2000.
- [35] Kuc, Roman and Bozma, Omur: Building a Sonar Map in a Specular Environment Using a Single Mobile Sensor, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Volume 13 - Number 12, 1991.
- [36] Kuc, Roman and Barshan, Billur: A Bat-Like Sonar System for Obstacle Localization, IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics, Volume 22 - Number 4, 1992.
- [37] Lopes, Sérgio Ivan: Relatório final - Projecto LocUS, Relatório interno, IEETA - Instituto de Engenharia Electrónica e Telemática de Aveiro, Universidade de Aveiro, 2008.
- [38] Lu, Mingzhu; Wang, Xiaodong; Wan, Mingxi; Feng, Yi; Xu, Feng; Zhong, Hui and Tan, Jinwen: Image-Guided 256-Element Phased-Array Focused Ultrasound Surgery, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, Volume 27 - Number 5, 2008.
- [39] Medina L. e Wykes C.: Multiple target 3D location airborne ultrasonic system, Technical report, Elsevier Science B. V., 2001.
- [40] Menezes, Paulo Jorge Carvalho: Navegação de Robôs Móveis, Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, 1999.
- [41] Mucci, Ronald A.: A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms, IEEE Acoustics, Speech and Signal Processing, Volume 32 - Number 3, 1984.
- [42] Oetiker, Tobias;Partl, Hubert; Hyna, Irene and Schlegl, Elisabeth: Uma não tão pequena introdução ao LATEX 2e, 2007.
- [43] Thomenius, Kai E.: Evolution of Ultrasound Beamformers, IEEE Ultrasonics Symposium, Volume 2 - Page 1615, 1996.
- [44] Vieira, José; Fonte, José; Gonçalves, Daniel e Almeida, Luís: Localização de Fontes Sonoras com Tolerância a Ambientes Reverberantes, Artigo para conferência, IEETA - Instituto de Engenharia Electrónica e Telemática de Aveiro, Universidade de Aveiro, 2003.
- [45] Vieira, José M. N. And Reis, João and Santos, Paulo and Almeida, Luís, "Detecção de Fontes Sonoras e Obstáculos Usando Técnicas de Correlação", Artigo para conferência, IEETA - Instituto de Engenharia Electrónica e Telemática de Aveiro, Universidade de Aveiro, 2001.

Apêndice A

Hardware

A.1 Circuito que inclui o array

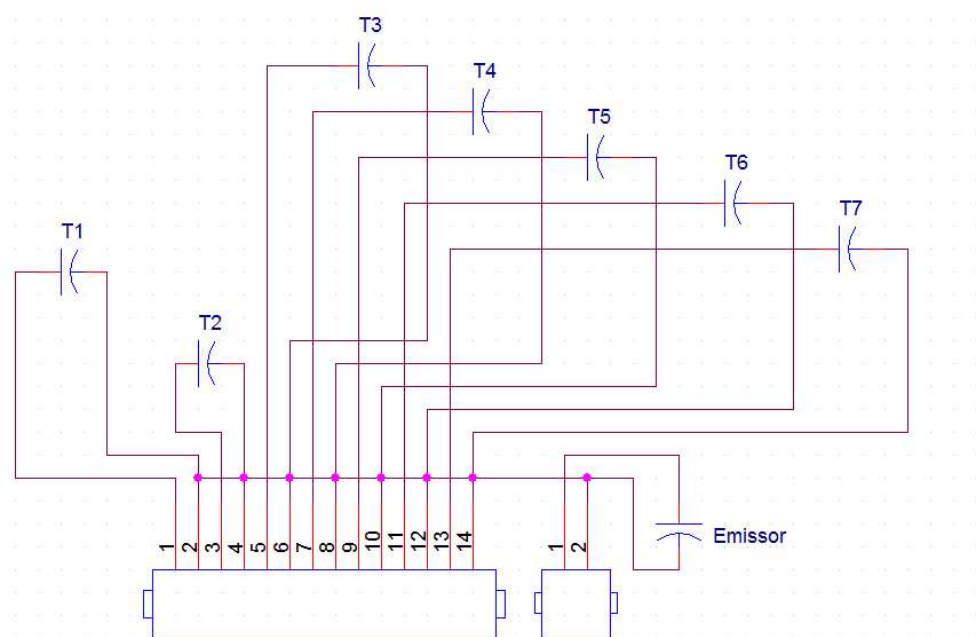


Figura A.1: Esquema eléctrico do PCB que inclui o array.

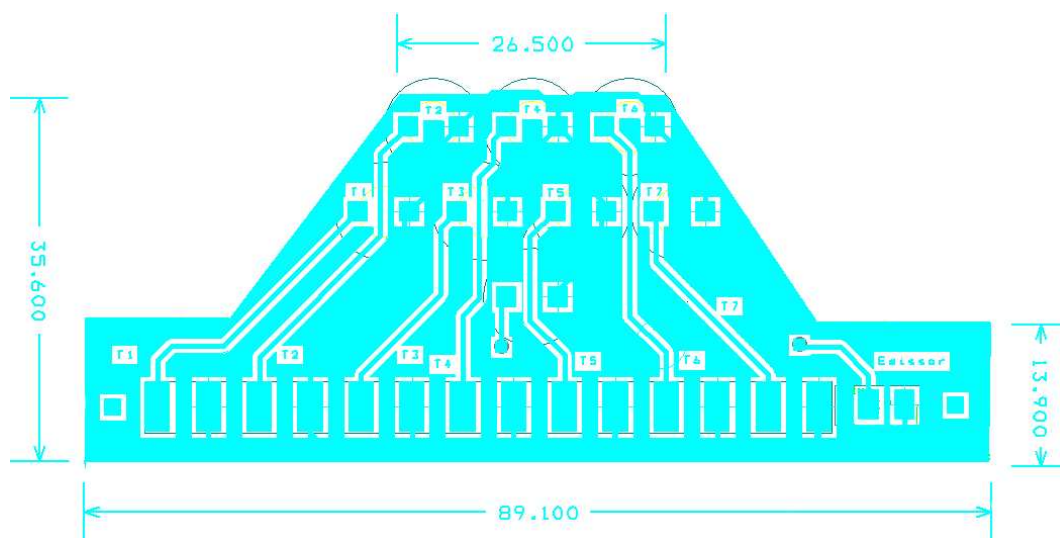


Figura A.2: Layout do PCB que inclui o array - Top.

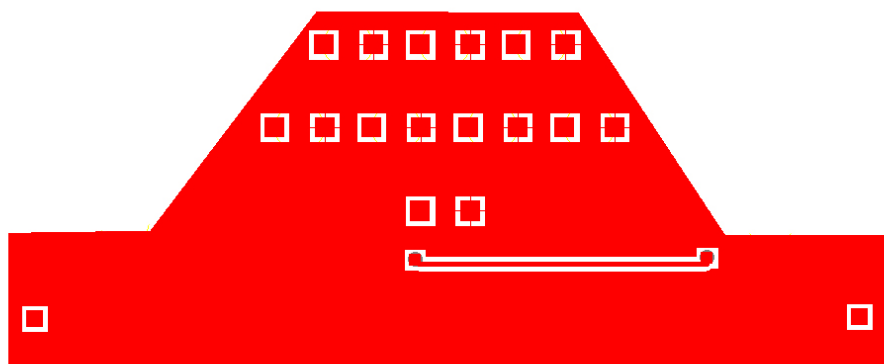


Figura A.3: Layout do PCB que inclui o array - Bottom.

A.2 Locus Board v.2.1

Amplificador Audio para phones stereo

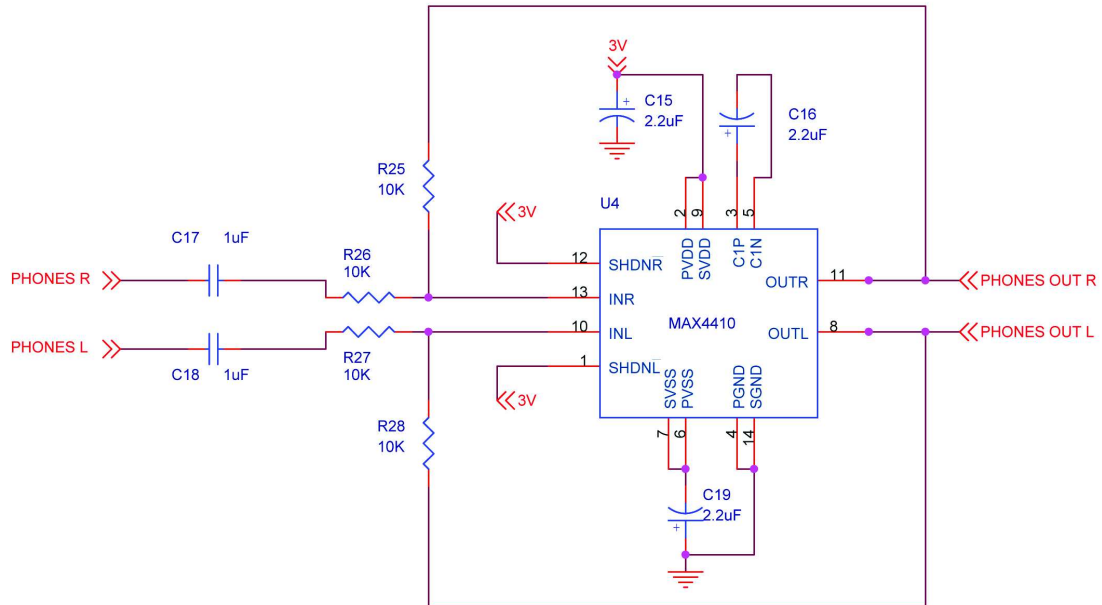


Figura A.4: Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Amplificador áudio para auscultadores estéreo (Fonte: [17]).

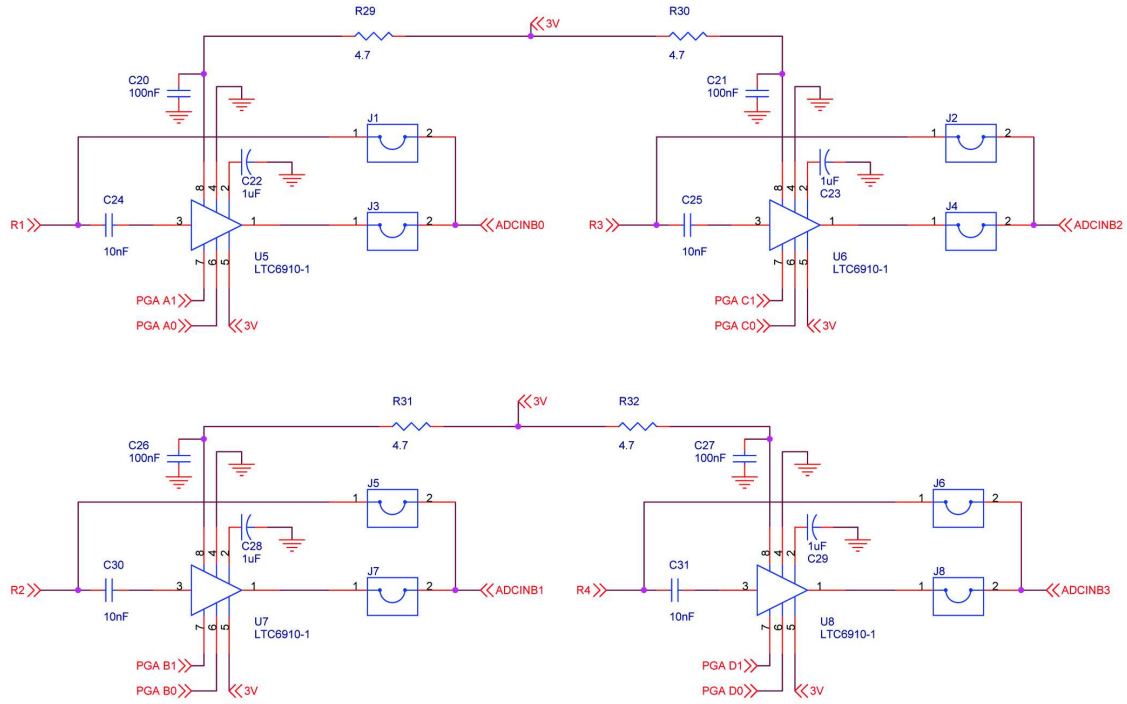


Figura A.5: Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Amplificador de ganho programável (Fonte: [17]).

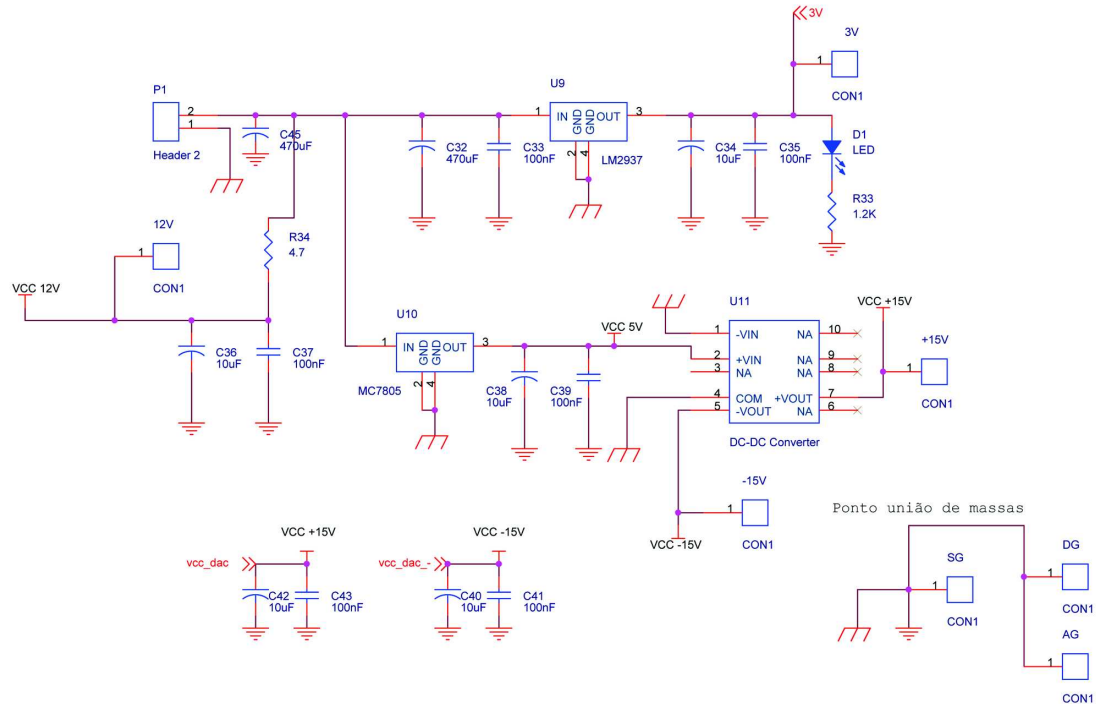


Figura A.6: Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Bloco de alimentação (Fonte: [17]).

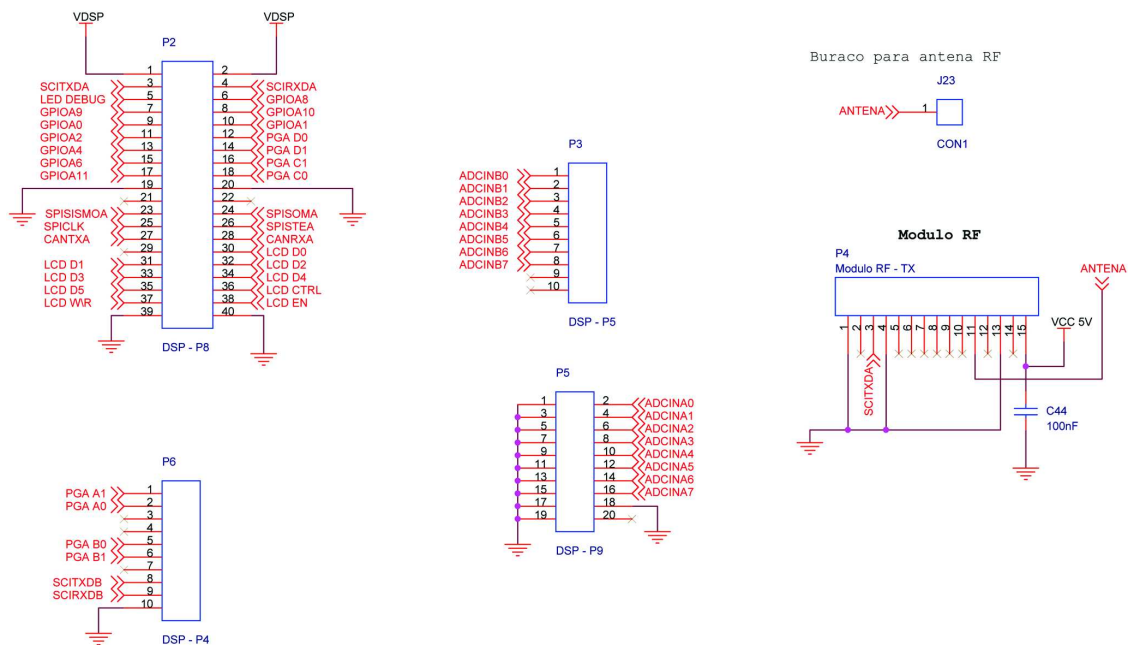


Figura A.7: Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - Conectores de interface com DSP + RF + Sense Bat (Fonte: [17]).

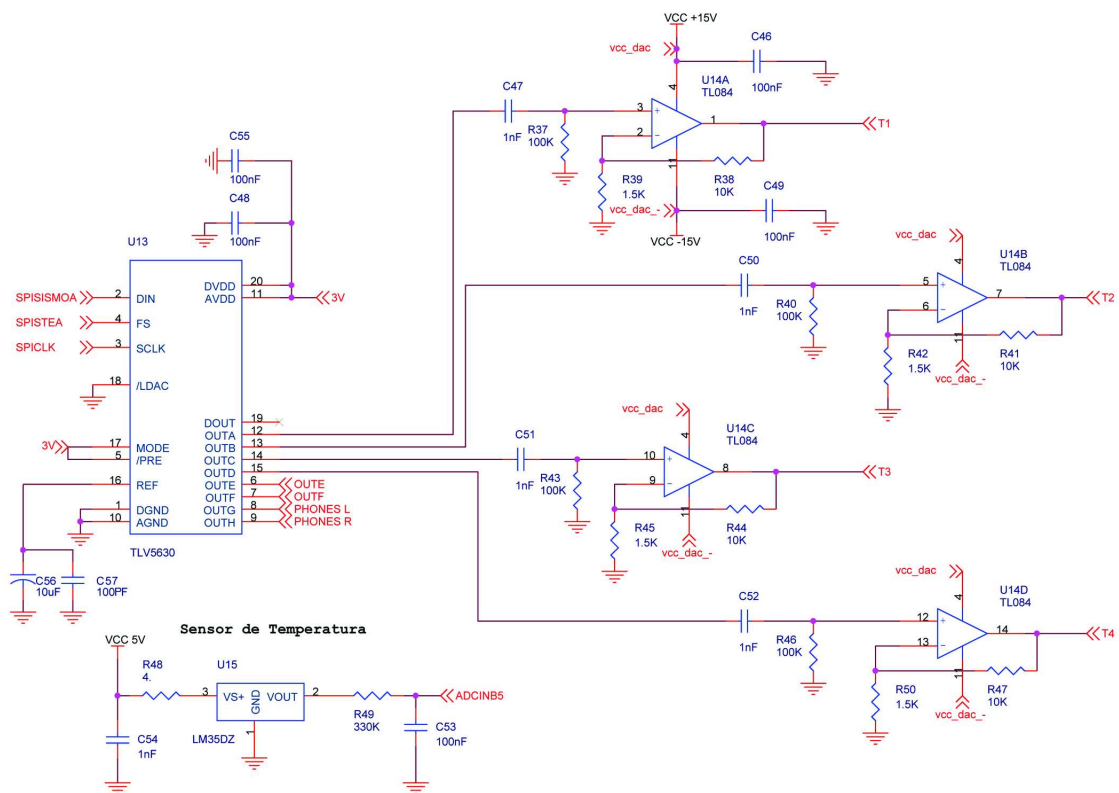


Figura A.8: Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - DAC + Sensor Temperatura (Fonte: [17], com alterações de Mário Lima).

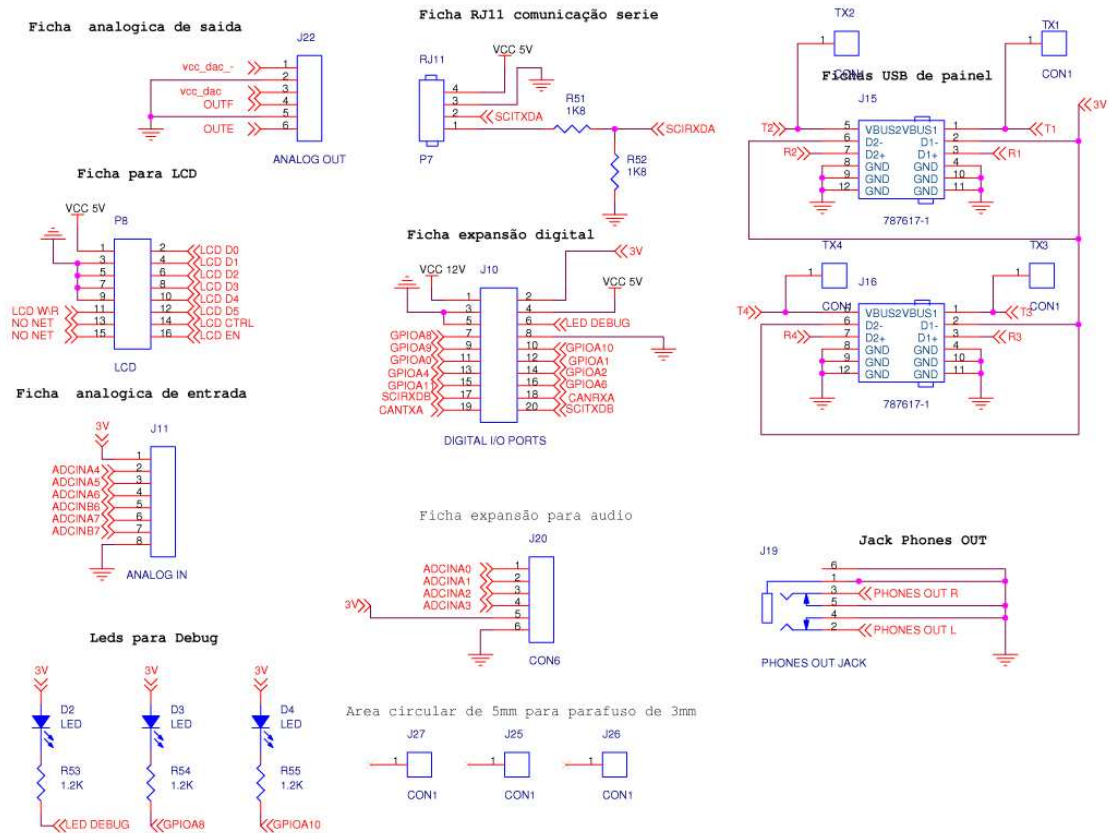


Figura A.9: Esquema eléctrico do PCB da Locus Board - I/O (Fonte: [17], alterado por Mário Lima).

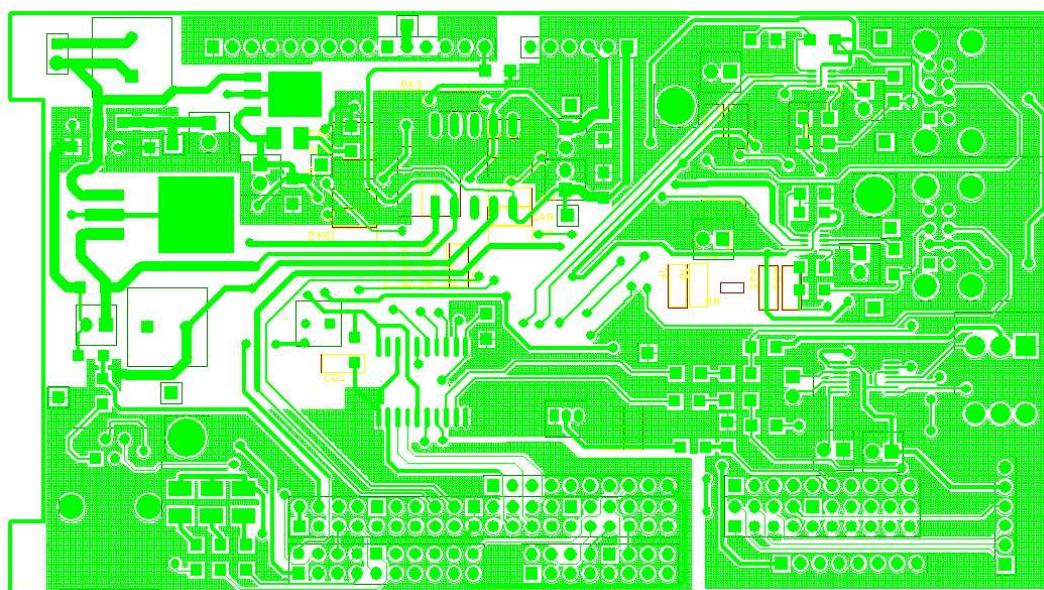


Figura A.10: Layout do PCB da LocusBoard - Top (Fonte: [17]).

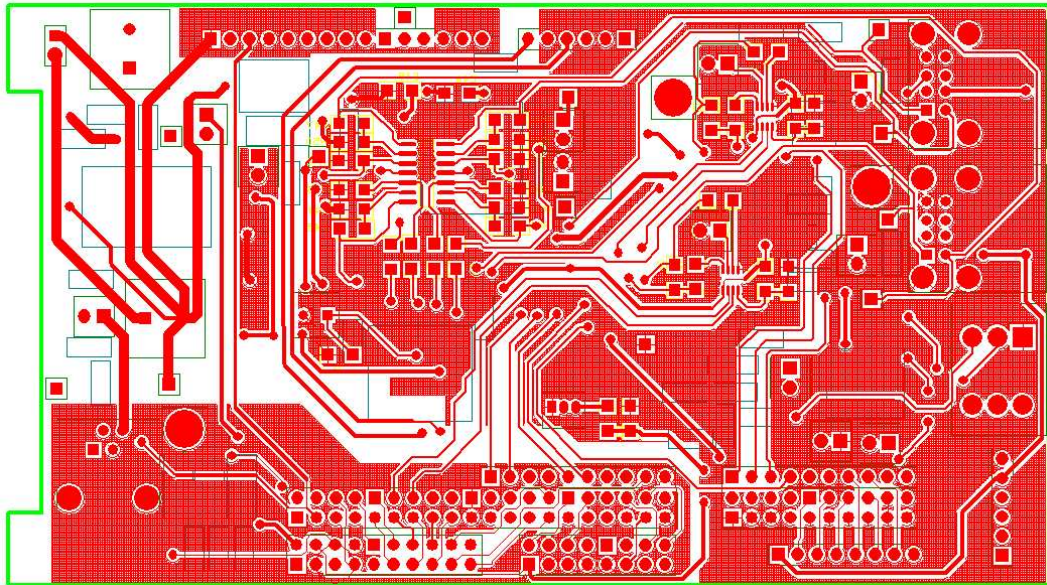


Figura A.11: Layout do PCB da *LocusBoard* - Bottom (Fonte: [17]).

A.3 Extensão da Locus Board

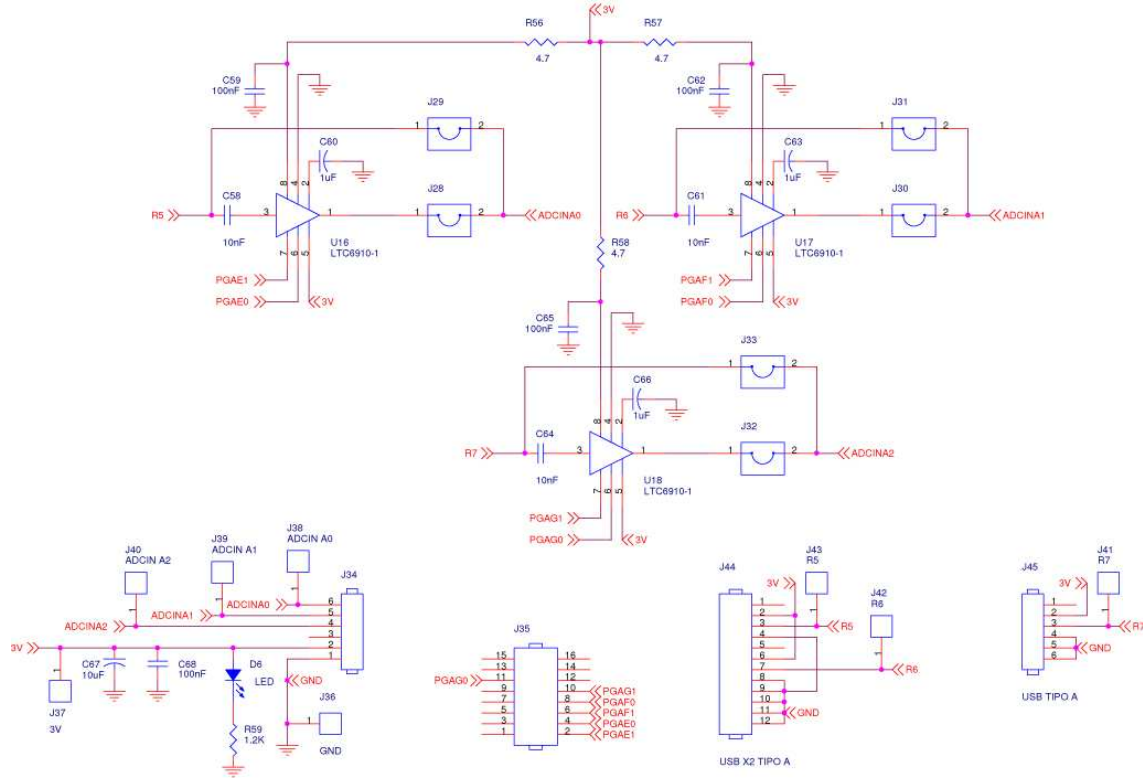


Figura A.12: Esquema eléctrico do PCB da extensão à *LocusBoard* (Baseado no esquema da Locus Board. Fonte: [17]).

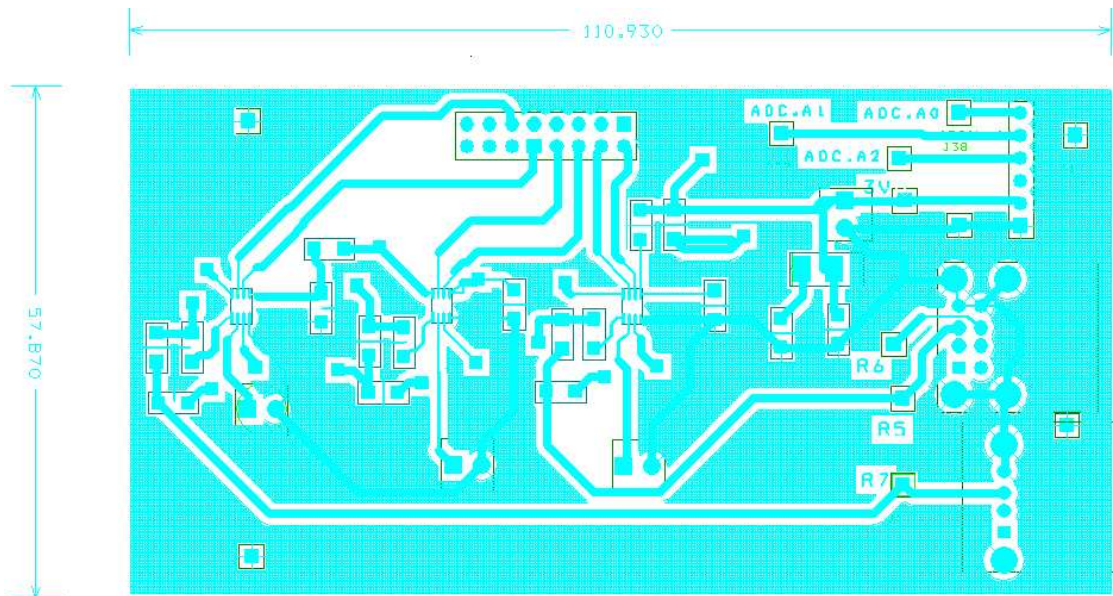


Figura A.13: Layout do PCB da extensão à *LocusBoard* - Top.

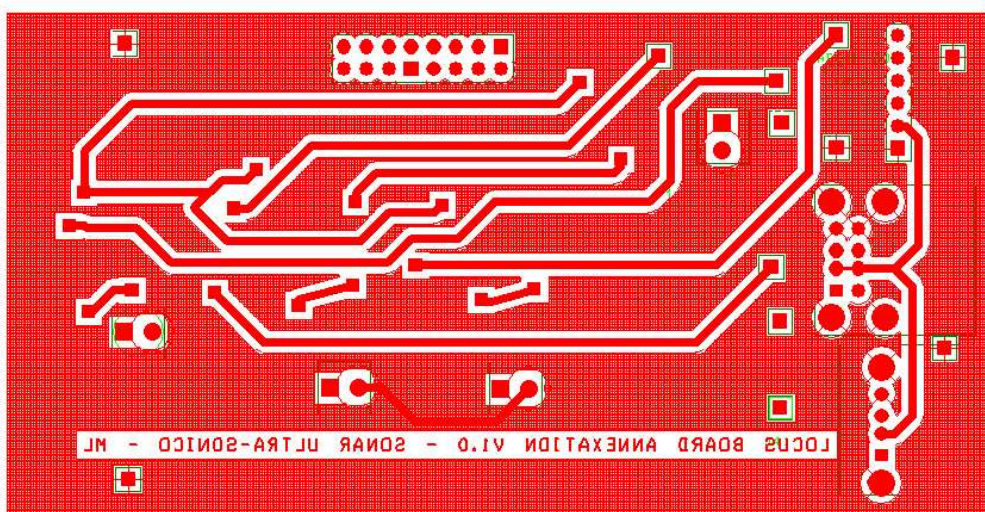


Figura A.14: Layout do PCB da extensão à *LocusBoard* - Bottom.

A.4 Circuito de apoio ao array

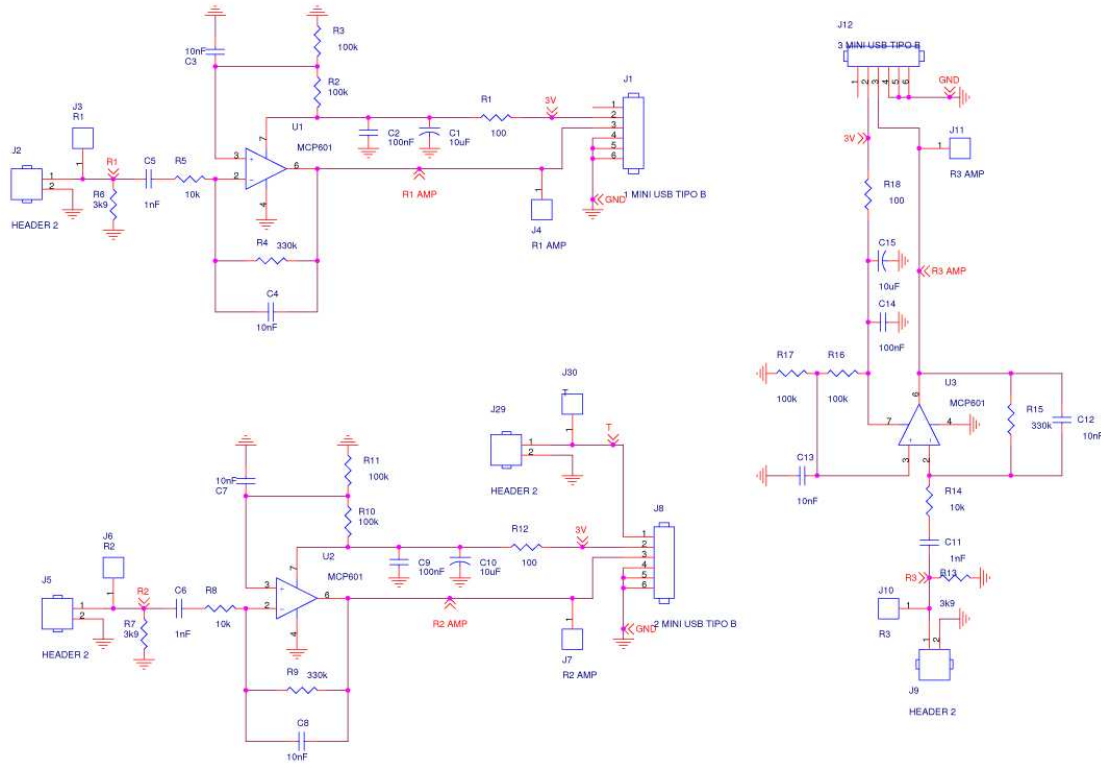


Figura A.15: Esquema eléctrico do PCB da placa de apoio à *LocusBoard* - parte 1 (Baseado no esquema da *beamforming_board*. (Fonte: [17]))

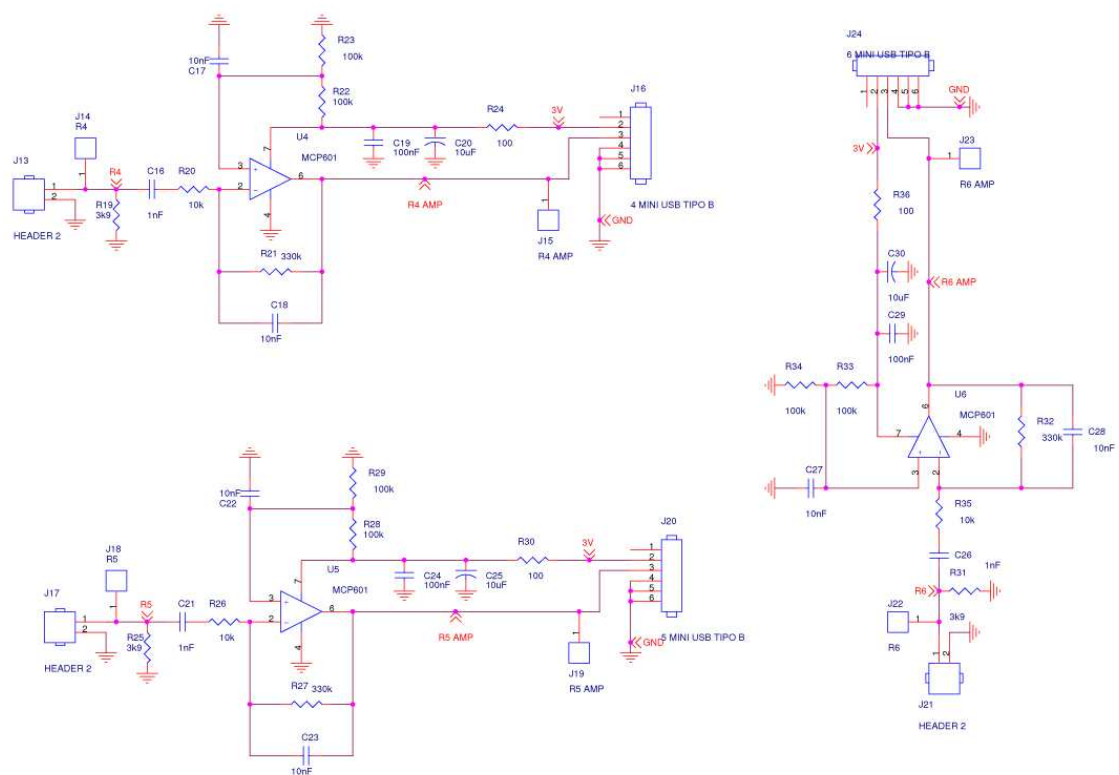


Figura A.16: Esquema eléctrico do PCB da placa de apoio à *LocusBoard* - parte 2 (Baseado no esquema da *beamforming_board*. Fonte: [17]))

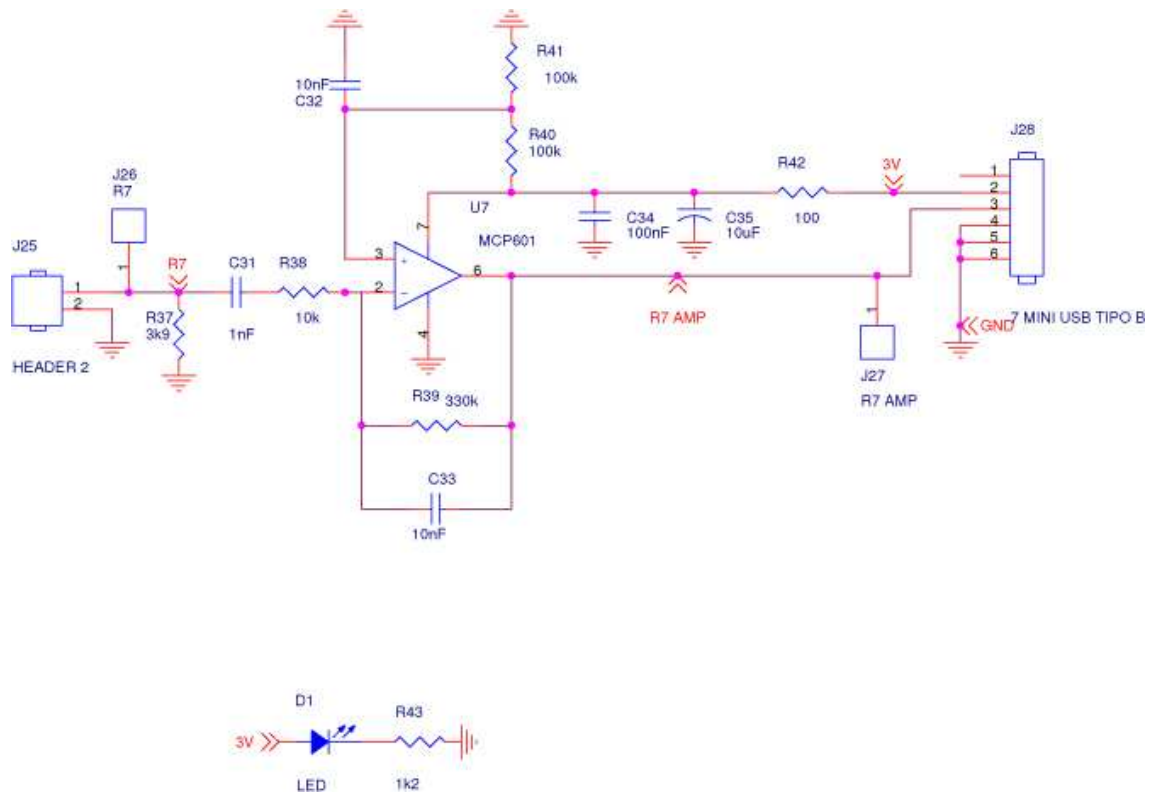


Figura A.17: Esquema eléctrico do PCB da placa de apoio à *LocusBoard* - parte 3 (Baseado no esquema da *beamforming_board*. Fonte: [17]))

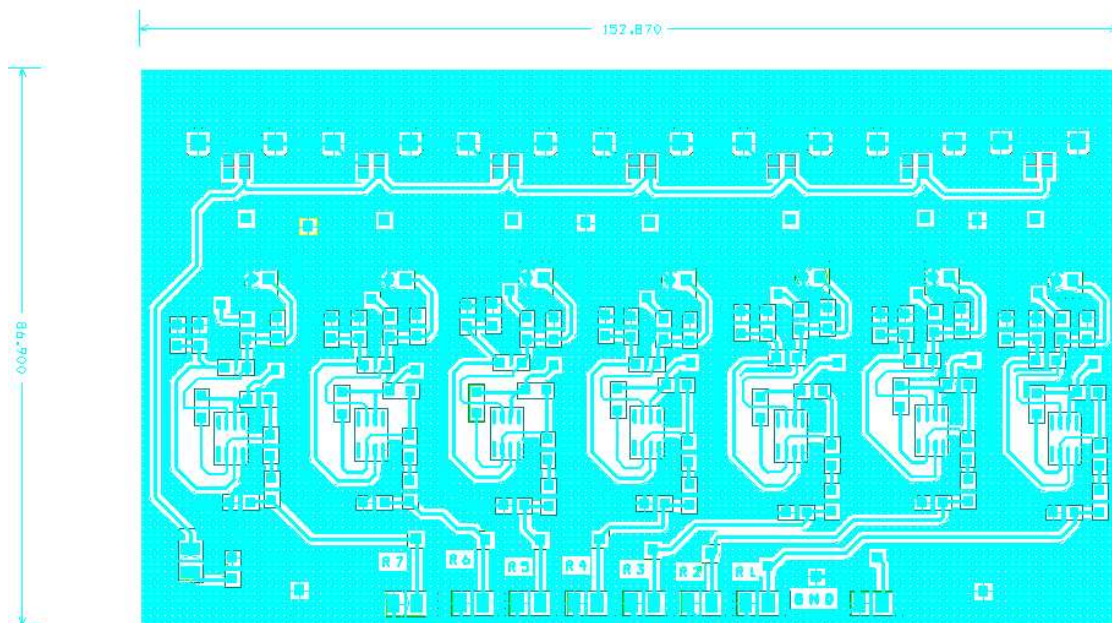


Figura A.18: Layout do PCB da placa de apoio à *LocusBoard* - Top.

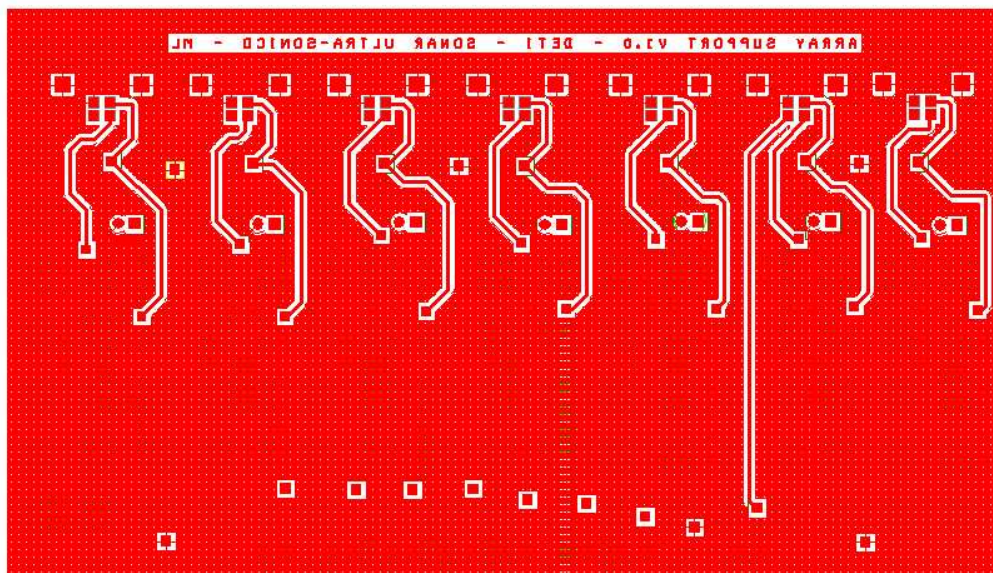


Figura A.19: Layout do PCB da placa de apoio à *LocusBoard* - Bottom.

A.5 Circuito somador usado na câmara anecóica

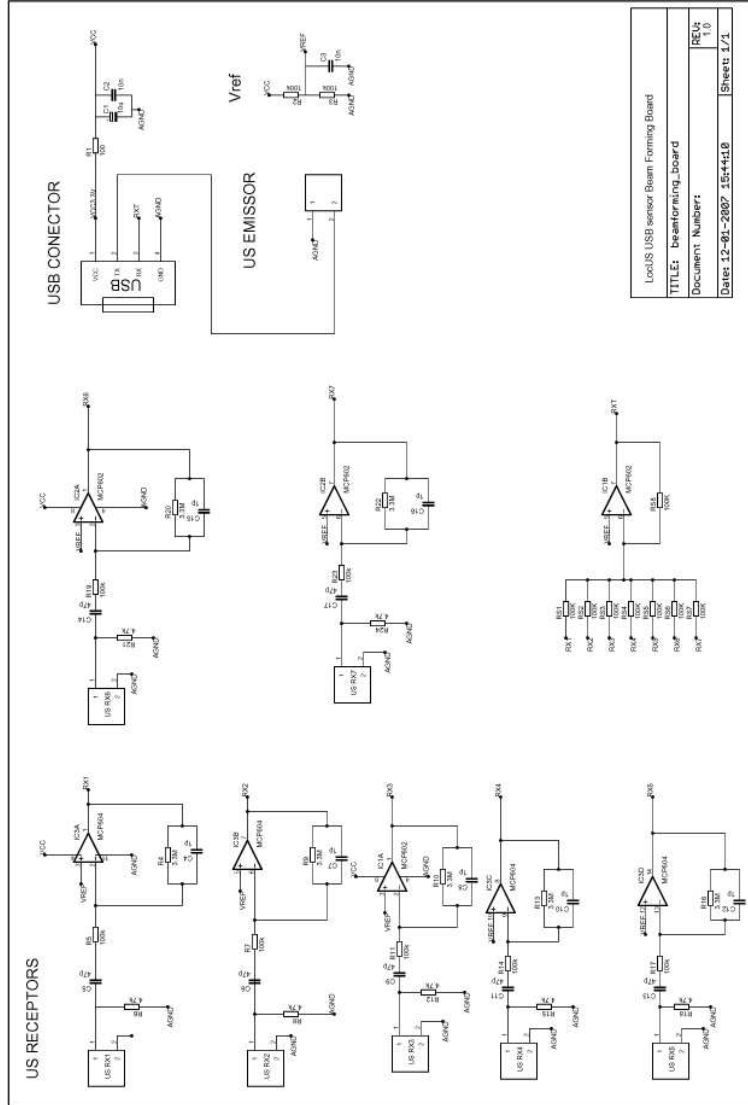


Figura A.20: Esquema eléctrico do PCB da placa somadora, usada na câmara anecóica (Fonte: [17])

Apêndice B

Referências de alguns transdutores ultra-sônicos

- Transdutor receptor usado no trabalho apresentado - REF: 400SR10B - Marca: PROWAVE; interface Ar e frequência de trabalho de 40 kHz.
- Transdutor emissor usado no trabalho apresentado - REF: 400ST10B - Marca: PROWAVE; interface Ar e frequência de trabalho de 40 kHz.
- Transdutor usado para análise de estruturas submersas - REF: i1-0204-S-SM - Marca: OLYMPUS; interface Água e frequência de trabalho de 2,25 MHz.
- Transdutor usado para análise de tubos e outras estruturas metálicas - REF: HS-225 - Marca: OLYMPUS; interface Metal e frequência de trabalho de 2,25MHz a 10 MHz.
- Transdutor usado para medições de distâncias - REF: UCC1000-30GM-IU-V1 - Marca: PEPPERL+FUCHS; interface Ar e frequência de trabalho de 175 kHz.
- Transdutor usado em limpeza de materiais - REF: Ultrasonic Cleaning Transducer 090 - Marca: MORGAN ELECTRO CERAMICS; interface Ar e frequência de trabalho de 35 kHz a 39 kHz.
- Transdutor usado para terapia, tratamento de pele, entre outros - REF: Ultrasonic Therapy Transducer 09134 - Marca: MORGAN ELECTRO CERAMICS; interface corpo humano e frequência de trabalho de 1 MHz.